

LIETUVOS ENERGETIKOS INSTITUTAS

LINA VOROTINSKIENĖ

DRĖGMĖS IŠSISKYRIMO IŠ SMULKINTOS MEDIENOS BIOKURO PAKUROSE TYRIMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (T 006)

Kaunas, 2023

Disertacija rengta 2015–2023 metais Lietuvos energetikos institute, Degimo procesų laboratorijoje.

Mokslinis vadovas:

Dr. Nerijus STRIŪGAS (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas: <http://ktu.edu>

Redagavo: Irma Urbonavičienė (IVP Nr. Nr. 670485)

TURINYS

SANTRUMPOS	5
PAGRINDINĖS SĄVOKOS.....	5
ŽYMĖJIMAI	6
IVADAS	9
1. LITERATŪROS APŽVALGA	12
1.1. Biomasės tipai	12
1.2. Medienos struktūra bei savybės	12
1.3. Drėgmės kiekio biokure nustatymo metodai.....	17
1.4. Biokuro drėgmės išsiskyrimo principai bei technologijos	20
1.5. Biokuro deginimo technologijos	24
1.5.1. Ardyninių pakurų konfigūracijos ir biokuro degimo modeliai	28
1.6. Drėgno biokuro deginimo tyrimai.....	30
1.6.1. Biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumą lemiantys veiksniai	31
1.6.2. Drėgmės išsiskyrimo greičio priklausomybė nuo užsiduotų tyrimo parametrų.....	32
1.6.3. Biokuro drėgmės išsiskyrimo bei degimo intensyvumas pakuros džiovinimo zonoje	37
1.7. Darbo uždavinių formulavimas ir autoriaus indėlis į nagrinėjamą problematiką.....	41
2. TYRIMŲ METODIKA	43
2.1. Smulkintos medienos bandinių fizikinės ir cheminės savybės	43
2.1.1. Bandinių komponentinė ir elementinė sudėtis	43
2.1.2. Bandinių dalelių charakteringo skersmens tyrimas	45
2.1.3. Smulkintos medienos bandinių paruošimas	45
2.2. Tyrimų standai	46
2.2.1. Tyrimų standas drėgmės išsiskyrimui iš smulkintos medienos bandinių tirti	46
2.2.2. Tyrimų standas smulkintos medienos bandinių drėgmės išsiskyrimui tirti	48
2.2.3. Gautų duomenų apdorojimas tarpusavio rezultatams palyginti	50
2.3. Virtualaus jutiklio pritaikymo biokuro pakurai reguliuoti pagal nustatytą drėgmės kiekį biokure tyrimo metodika.....	51
2.3.1. Bandymams naudoto biokuro charakteristikos.....	53
2.3.2. Drėgmės kiekio smulkintos medienos biokure nustatymas remiantis DKE šilumos balanso lygtimis.....	54
2.4. Eksperimentinių bandymų rezultatų apdorojimas	56
3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS.....	60
3.1. Drėgmės išsiskyrimo pobūdis smulkintos medienos biokuro bandiniuose..	60
3.2. Pirminio oro įtaka stacionaraus smulkintos medienos biokuro sluoksnio drėgmės išsiskyrimui.....	62
3.2.1. Temperatūros pasiskirstymas smulkintos medienos biokuro sluoksnyje	62
3.2.2. Drėgmės kitimas smulkintos medienos biokuro sluoksnyje	66

3.3. Recirkuliacijos dūmų įtaka stacionaraus smulkintos medienos biokuro sluoksnio drėgmės išsiskyrimui.....	68
3.3.1. Temperatūros pasiskirstymas smulkintos medienos biokuro sluoksnyje	68
3.3.2. Drėgmės kitimas smulkintos medienos biokuro sluoksnyje	72
3.4. Spinduliavimo bei pirminio oro įtaka stacionaraus smulkintos medienos biokuro sluoksnio drėgmės išsiskyrimui	74
3.4.1. Temperatūros pasiskirstymas smulkintos medienos biokuro sluoksnyje	74
3.4.2. Drėgmės kitimas smulkintos medienos biokuro sluoksnyje	78
3.5. Smulkintos medienos biokuro frakcijos įtaka drėgmės išsiskyrimo greičiui	80
3.6. Smulkintos medienos biokuro sluoksnio maišymo įtaka drėgmės išsiskyrimo greičiui.....	82
4. VIRTUALAUS JUTIKLIO PRITAIKYMAS PAKUROS REGULIAVIMUI PAGAL NUSTATYTĄ KURO DRĖGNUMĄ.....	86
4.1. Biokuro drėgmės prognozavimas automatiniam pakuros valdymui	89
5. GAUTŲ REZULTATŲ APIBENDRINIMAS IR PALYGINIMAS SU KITŲ TYRĖJŲ REZULTATAIS	96
LITERATŪRA	102
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	115

SANTRUMPOS

AEI	Atsinaujinantys energijos ištekliai
BVS	Burbuliuojantis verdantis sluoksnis
DKE	Dūmų kondensacinis ekonomizeris
CVS	Cirkuliuojantis verdantis sluoksnis
CŠT	Centralizuotas šilumos tiekimas
FT-IR	Furjė transformacijos infraraudonųjų spindulių spektroskopija
IR	Infraraudonieji spinduliai
LOJ	Lakieji organiniai junginiai
NIR	Artimoji infraraudoniesiems spinduliams diapazono spektroskopija
RH	Išeinančių dūmų santykinė drėgmė
SCADA	Duomenų surinkimo ir apdorojimo sistema
ES	Europos Sąjunga

PAGRINDINĖS SĄVOKOS

Sausas biokuras	< 15 % drėgmės pagal masę;
Drėgnas biokuras	> 45 % drėgmės pagal masę;
Labai drėgnas biokuras / daug drėgmės turintis biokuras SM3	> 60 % drėgmės pagal masę; Biokuro techn. specifikacija, kai kuro drėgmė yra 35–60 % pagal masę ir jame yra iki 10 % smulkios frakcijos dalelių.
Pseudovirimas	Netikras, tariamas biokuro dalelių judėjimas deginant kurą virš perforuotos plokštės. Pseudovirimas nieko bendro neturi su virimo procesu, tačiau biokuro dalelių judėjimas dėl paduodamo iš apačios oro srauto primena skysčių virimą.

ŽYMĖJIMAI

a	įėjimo dydžio sklaidos intervalas;
$CH_{1.44}O_{0.66}$	vidutinė sauso biokuro, naudojamo deginimui, sudėtis;
$c_i(\bar{x})$	įtakos koeficientas;
c_{p1}	savitoji sausų išmetamųjų dūmų šiluma (kJ/kg K);
c_{p2}	savitoji vandens garavimo šiluma (kJ/kg K);
$c_{p,wv}$	savitoji vandens garo šiluma (kJ/kg K);
d/dt	laiko intervalo ciklas; $dt = t_i - t_{i-1}$ (h);
d_k	drėgmės kiekis biokure (%);
$\frac{d\bar{Y}^{HB}}{dt}$	vidutinės biokuro drėgmės išvestinė pagal laiką (%/h);
$d\bar{Y}_j^{HB}$	laiko išvestinė, apskaičiuojama laiko momentu t_i ;
g_{H_2O}	bandinio drėgmės išsiskyrimo greitis, apskaičiuotas netiesioginiu būdu (g/s);
h_D	drėgmės kiekis sausose išeinančiose dūmuose prieš DKE;
h_{D1}	likutinės drėgmės kiekis, išreikštas sausų išmetamųjų dūmų masės frakcija;
h_g	drėgmės kiekis išeinančiuose dūmuose (g/m ³);
i	matavimo taškas;
j	matavimo taško imtis;
Y	nekoreliuotas įėjimo dydis;
Y_{HB}	biokuro drėgmės kiekis, apskaičiuotas pagal DKE šilumos balanso metodą (%);
Y_m	normalizuotas drėgmės kiekis biokuro bandinyje (sant. vnt.);
$\bar{y}$	matuojamo dydžio Y įvertis;
k	sklaidos dėsnio aprėpties daugiklis;
L	ardyno ilgis (m);
Q_z	žemutinis visiškai sauso smulkintos medienos biokuro šilumingumas (kJ/kg);
m_{mf}^{HBg}	išmetamuosiuose dūmuose esantis drėgmės kiekis, apskaičiuotas iš ekonomaizerio šilumos balanso (kg/h);
m_i	bandinio masė (g) laiko momentu t_i , kur bandinio masės vertės $m_1, m_2, m_3 \dots m_i$;
m_{i-1}	bandinio masė laiko momentu t_{i-1} (g);
$m_{(t_i=0)}$	pradinė bandinio masė (g);
$m_{H_2O(i)}$	drėgmės kiekis išeinančiuose dūmuose (g);
m_D	degimo produktų kiekis, susidarantis sudeginus 1 kg biokuro (g);
m_F	etaloninė biokuro masė (1 kg);

m_{O_2}	sausos oro kiekis, sunaudotas sudeginti 1 kg biokuro (g);
m_{H_2O}	vandens garų kiekis, susidarantis sudeginus 1 kg biokuro (g);
m_p	pradinė bandinio masė prieš džiovinimą (g);
m_s	sausos bandinio masė (g);
n	matavimų skaičius;
N	matavimų periodas;
r_{BH}	bandinių drėgmės išsiskyrimo greitis (g/s);
r_{BHmax}	didžiausia bandinio drėgmės išsiskyrimo greičio reikšmė per visą matavimų laiką (g/s);
$s(\bar{x})$	apskaičiuojamas eksperimentinis standartinis nuokrypis;
t	laikas (s);
T_{apl}	aplinkos temperatūra (°C);
T_d	išeinančių dūmų temperatūra (°C);
T_{fg}	įeinančių išmetamųjų dūmų temperatūra (°C);
T_{fg1}	išeinančių išmetamųjų dūmų temperatūra (°C);
U	išėjimo dydžio matavimo išplėstinė neapibrėžtis;
$u(\bar{x})$	nekoreliuoto eksperimentinio išmatuoto įėjimo dydžio x vidurkio standartinis nuokrypis;
$u(y)$	išėjimo įvėrcio matavimo suminė standartinė neapibrėžtis;
$u_A(h_g)$	neapibrėžtis dėl eksperimentinės matavimo sklaidos, matuojant drėgmės kiekį išeinančiuose dūmuose (g/m ³);
$u_A(V_{oro})$	neapibrėžtis dėl eksperimentinės matavimo sklaidos, matuojant sausos oro srautą (m ³ /h);
$u_A(V_{H_2O(g)})$	neapibrėžtis dėl eksperimentinės matavimo sklaidos, matuojant vandens garų srautą (m ³ /h);
$u_A(T_d)$	išeinančių dūmų temperatūros neapibrėžtis dėl eksperimentinės matavimo sklaidos;
$u_B(h_g)$	drėgmės jutiklio kalibravimo neapibrėžtis;
$u_B(V_{oro})$	rotometro kalibravimo neapibrėžtis;
$u_B(V_{H_2O(g)})$	aspiratoriaus kalibravimo neapibrėžtis;
$u_B(T_d)$	temperatūrinio jutiklio kalibravimo neapibrėžtis;
$u_r(h_g)$	drėgmės jutiklio nuskaitymo neapibrėžtis;
$u_r(V_{oro})$	rotometro nuskaitymo neapibrėžtis;
$u_r(V_{H_2O(g)})$	aspiratoriaus nuskaitymo neapibrėžtis, matuojant vandens garų srautą (m ³ /h);
$u_r(T_d)$	aspiratoriaus nuskaitymo neapibrėžtis, matuojant išeinančių dūmų temperatūrą (°C);
$V_{H_2O(g)}$	vandens garų srautas (m ³ /h);

$V_{H_2O(kuro)}$	drėgmės kiekis sraute, susidaręs džiūstant bandiniui (m^3/h);
$V_{H_2O(rec.pr.)}$	drėgmės kiekis sraute įvedus į srautą $17\text{ g}/m^3$ vandens garo, imituojant recirkuliacijos dūmų patekimą į pakurą (m^3/h);
V_{oro}	sauso oro srautas (m^3/h);
α	oro pertekliaus koeficientas;
η	katilo naudingumo koeficientas;
Q_{fg}^{dry}	DKE išgautas šilumos kiekis (kJ/kg);
Q_B	katilo našumas (kW);
Q_{DKE}	kondensacinio ekonomizerio šiluminė galia (kW);
ΔY_m	drėgmės kiekio pokytis biokure (sant. vnt.);
ΔY_{max}	drėgmės kiekio biokure vertė normalizuota pagal didžiausią drėgmės kiekį ir sauso bandinio masės santykio vertę per visą tyrimo atlikimo laikotarpį, t. y. 30 minučių (sant. vnt.);
ΔY_{min}	drėgmės kiekio biokure vertė normalizuota pagal mažiausią drėgmės kiekį ir sauso bandinio masės santykio vertę per visą tyrimo atlikimo laikotarpį t. y. 30 minučių (sant. vnt.);
Δt	matavimų periodas (s), $\Delta t = t_i - t_{i-1}$;
X	eksperimentiniuose bandymuose matuojamas įėjimo dydis, gaunamos vertės $x_1, x_2, x_3, \dots x_n$;
x	matuojamo parametro vertė;
$\bar{x}$	verčių aritmetinis vidurkis;
x_i	i-tojo matavimo reikšmė;
$\bar{x}_j$	vidutinė išlyginta matuojamo parametro vertė;
ω	svorio faktorius;
W	apskaičiuotas smulkintos medienos bandinio drėgmės kiekis (%) pagal pradinę bandinio masę;
W_p	pradinis drėgmės kiekis bandinyje (g) ($W_p = W_1$);
W_i	drėgmės kiekis bandinyje (g), kur drėgmės kiekio vertės $W_1, W_2, W_3 \dots W_i$ laiko momentu $t_1, t_2, t_3 \dots t_i$;
$\delta(Y)$	matuojamo dydžio Y santykinė neapibrėžtis (%);

IVADAS

ES valstybės pagal atnaujintus klimato srities veiksmų planus įsipareigojo iki 2030 m. sumažinti išmetamų teršalų kiekį bent 55 %. Lietuvoje taršiausi sektoriai, kurie į aplinką išmeta daugiausiai Europos standartuose reglamentuojamų kenksmingų teršalų, yra transportas, energetika ir žemės ūkis. Kadangi Lietuvoje gerai išvystytas centralizuotas šildymas, todėl dalį įsipareigojimų dėl teršalų mažinimo valstybė gali pasiekti šiame sektoriuje, absoliučiai atsisakydama iškastinio kuro ir gamindama šilumos energiją iš atsinaujinančių energijos išteklių (AEI). Jau šiuo metu 80 % šiluminės energijos pagaminama iš AEI, t. y. deginant smulkintos medienos biokurą biokuro katilinėse.

Susidarius tokiai geopolitinei situacijai bei dėl to, kad šilumos gamintojai nori išlikti konkurencingi – dažniausiai į biokuro katilines tiekiamas prastesnės kokybės biokuras. Pagal nustatytas technines specifikacijas, SM3 kokybės klasės biokuro drėgmė gali siekti iki 60 % pagal masę ir jame gali būti iki 10 % smulkios frakcijos dalelių. Dažnu atveju toks biokuras neatitinka pakuros nustatytų darbinų parametrų.

Ne tik didėjanti biokuro paklausa lemia prastos kokybės biokuro patekimą į pakurą ant ardyno, bet ir tai, kad biokuras dažnu atveju yra sandėliuojamas po atviru dangumi, todėl jis būna paveiktas kritulių ir jo drėgmės kiekis gali siekti 60 % ir daugiau. Toks biokuras, patekęs į pakurą ant ardyno, nedega, o džiūsta ir šis drėgmės išsiskyrimo procesas užima didžiąją dalį ardyno (STRIUGAS et al. 2017). Tokio neigiamo poveikio būtų galima išvengti intensyvinant biokuro drėgmės išsiskyrimą pakuros džiovinimo zonoje ir optimizuojant ardyninės pakuros valdymą. Tam pasiekti turi būti žinomi procesų priklausomumai, turintys įtakos biokuro drėgmės išsiskyrimo proceso intensyvumui. Dėl šių priežasčių buvo suprojektuotas ir sumontuotas eksperimentinis standas, kurio darbiniai parametrai atitinka tipinės 6 MW ardyninės pakuros darbinus parametrus, bei atlikti biokuro drėgmės išsiskyrimo eksperimentiniai tyrimai. Eksperimentiniai tyrimai atlikti imituojant pašildyto pirminio oro, išmetamųjų dūmų recirkuliacijos, spinduliavimo nuo vidinių pakuros paviršių bei maišymo įtaką. Tyrimams buvo naudoti prastos kokybės (atitinka SM3), daug drėgmės (60 ± 5 %) turintys smulkintos medienos biokuro bandiniai. Pirminiai eksperimentinių tyrimų rezultatai parodė, kad vien tik tiekiant iki 200 °C temperatūros pirminį orą arba recirkuliacijos dūmus galima sumažinti smulkintos medienos drėgmės kiekį iki 13 % (smulkesnės frakcijos iki 23 %), vertinant drėgmės netekimą nuo pradinės drėgmės kiekio biokure. Tačiau taikant kompleksines priemones gauti ženkliai reikšmingesni rezultatai. Tiekiant pro ardyno apačią 200 °C orą bei imituojant spinduliavimą nuo įkaitusių paviršių, buvo nustatyta, kad per 30 min smulkintos medienos drėgmės kiekio pokytis yra apie 36 %. Gautų rezultatų analizė atskleidė, kad spinduliavimas drėgmės išsiskyrimo procesą suintensyvina net 2–3 kartus. Taip pat eksperimentiškai nustatyta, kad drėgmės išsiskyrimo intensyvumas priklauso nuo biokuro granulometrijos ir kad drėgmės išsiskyrimo greitis didėja, kai bandinio dalelių dydis mažėja. Siekiant nustatyti maišymo įtaką biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumui, buvo atlikti papildomi bandymai imituojant grotelių judėjimą. Eksperimentais įrodyta, kad maišymas intensyvina drėgmės išsiskyrimo procesą iki 1,6 karto ir drėgmės kiekio pokytis biokure gali siekti net 58 %.

Atlikta mokslinės literatūros apžvalga rodo, kad smulkintos medienos drėgmės išsiskyrimo procesas biokuro pakurose ant judančio ardyno, deginant 60 % ir daugiau drėgmės turintį biokurą, nėra išsamiai ištirtas, todėl nepakanka žinių apie drėgmės išsiskyrimo ir degimo procesų intensyvumui įtakos turinčius veiksnius. Iš to seka šio darbo **tyrimų objektas** – drėgnos smulkintos medienos biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumas pakuroje.

Darbo tikslas

Ištirti skirtingų savybių drėgnos (60 ± 5 %) smulkintos medienos sluoksnio džiūvimą ir nustatyti degimo procesą lemiančių veiksnių įtaką drėgmės išsiskyrimui.

Darbo uždaviniai

Imituojant judančios ardyninės pakuros džiovinimo zonoje vykstančius procesus, būtina atlikti šiuos pagrindinius uždavinius:

- 1) Naudojant skirtingos frakcinės sudėties drėgną smulkintą medieną ir eksperimentiškai imituojant skirtingas džiūvimo sąlygas, nustatyti drėgmės išsiskyrimo greitį:
 - a) į sluoksnio apačią tiekiant skirtingos temperatūros pirminį orą,
 - b) į sluoksnio apačią tiekiant skirtingos temperatūros pirminio oro ir recirkuliacijos dūmų mišinį,
 - c) į sluoksnio apačią tiekiant skirtingos temperatūros pirminį orą ir infraraudonųjų spindulių šilumos šaltinį, siekiant imituoti šilumos spinduliavimą nuo įkaitusių vidinių pakuros paviršių.
- 2) Nustatyti smulkintos medienos drėgmės išsiskyrimo greitį keičiant kuro sluoksnio maišymo dažnį ir naudojant didžiausią įtaką džiūvimui turinčius veiksnius.
- 3) Išnagrinėti didžiausią įtaką džiūvimui turinčių veiksnių keitimo galimybes, siekiant kontroliuoti drėgmės išsiskyrimo procesą realiose biokuro pakurose.

Darbo aktualumas

Biokuro deginimas – tai vienas dažniausiai naudojamų būdų šilumos ir elektros energijos gamybai iš biomasės. Tačiau biokuro deginimas yra sudėtingas procesas, o dėl nuolat kintančios jo sudėties susiduriama su įvairiomis problemomis, tokiomis kaip nevisiškas kuro sudegimas ar pavojingų teršalų susidarymas. Viena iš dažniausiai kintamų biokuro savybių yra kuro drėgnis, kuris kinta plačiose ribose ir gali siekti daugiau nei 60 % patenkančio kuro masės. Labai drėgna smulkinta mediena pakuroje ant ardyno nedega, o džiūva, užimdama didžiąją dalį ardyno. Siekiant tobulinti biokuro deginimo įrenginius, pirmiausiai reikia nustatyti biokuro drėgmės išsiskyrimui ant ardyno turinčių veiksnių įtaką, priežastis ir priklausomumus nuo džiovinimo agento temperatūros ar įkrovos maišymo periodo. Pagal gautus rezultatus biokuro katiluose galima sukurti ir integruoti virtualius drėgmės kitimo prognozavimo jutiklius, leidžiančius efektyviau eksploatuoti biokuro deginimo įrenginius.

Mokslinis naujumas

Ištirta drėgnos (60 ± 5 %) smulkintos medienos drėgmės išsiskyrimo biokuro sluoksnyje dinamika ir nustatytas jos priklausomumas nuo degimo procesui įtaką turinčių veiksnių.

Rezultatų praktinė reikšmė

Disertacijoje gauti rezultatai leidžia optimizuoti drėgnos (60 ± 5 %) smulkintos medienos biokuro degimo procesą, padidinti jo efektyvumą esamose ar naujai kuriamose judančiose ardyninėse pakurose. Biokuro drėgniui, patenkančiam į pakurą, prognozuoti ir džiūvimo procesui intensyvinti galima sukurti ir įdiegti virtualius jutiklius, leidžiančius efektyviau eksploatuoti biokuro deginimo įrenginius.

Ginamieji disertacijos teiginiai

1) Didžiausias drėgmės išsiskyrimo greitis pasiekiamas džiovinant smulkiausios frakcijos biokurą, o didinant pirminio oro temperatūrą, drėgnos smulkintos medienos drėgmės išsiskyrimas didėja.

2) Deginant 60 ± 5 % drėgmės biokurą, mažesnė nei $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ recirkuliuojamų dūmų temperatūra drėgmės išsiskyrimo procesą veikia neigiamai.

3) Pirminis oras ir šilumos spinduliavimas nuo įkaitusių vidinių pakuros paviršių neleidžia pasiekti optimalaus drėgmės kiekio biokuro sluoksnyje.

4) Degimo procesui įtaką turinčių veiksnių visuma leidžia pasiekti 2 kartus intensyvesnį drėgmės išsiskyrimą.

5) Pakuros valdyme įdiegtas drėgmės kiekio dūmuose skaičiavimo algoritmas leidžia prognozuoti tiekiamo į pakurą biokuro drėgmės kitimą.

Disertacijos rezultatų apibavimas

Disertacijoje pateikti tyrimų rezultatai paskelbti 3 moksliniuose straipsniuose, iš kurių du paskelbti žurnaluose, turinčiuose citavimo indeksą ir yra referuojami „Clarivate Analytics“ duomenų bazėje „Web of Science Core Collection“, trečiasis yra publikuotas moksliniame žurnale, įregistruotame tarptautinėse mokslinės informacijos duomenų bazėse. Tyrimų rezultatai taip pat pristatyti 11 konferencijų, 8 iš jų – tarptautinės.

Darbo struktūra

Disertaciją sudaro 3 pagrindiniai skyriai: literatūros apžvalga, eksperimentinės įrangos ir tyrimų metodikos aprašymas ir tyrimų rezultatų aptarimas. Disertacijos apimtis – 118 puslapių, 58 paveikslai, 6 lentelės ir 138 literatūros šaltiniai.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Daugelis pasaulio valstybių, vedamos ekologinių tikslų, iš esmės keičia iškastinį kurą biokuru. Šiandien daugiau kaip 40% kietojo biokuro sudeginama gyventojų namų šildymui, todėl mediena išlieka populiariausias atsinaujinantis energijos šaltinis (AEI) (European Biomass Association 2017). Smulkinta mediena yra antrinė, likutinė medžiaga, gaunama vykdant ugdomuosius ir pagrindinio naudojimo miško kirtimus. Mediena, kuri nėra tiesiogiai naudojama pramonei, yra susmulkinama ir sudeginama katiluose, siekiant pagaminti energiją. Smulkinta mediena laikoma tvarią energijos šaltiniu, nesukeliančiu šiltnamio efekto (Wahlund, Yan, Westermarck 2004), kadangi deginant medieną išmetamas į atmosferą CO₂ anglies dioksido kiekis yra toks pat, kaip natūraliai yrant medienos atliekoms miške. Augalų augimo metu vykstant fotosintezės procesui, augalai sugeria tiek pat anglies dvideginio, kiek degimo metu ar medienos atliekų irimo metu yra išskiriama, todėl anglies dioksido kiekis, išskiriamas į aplinką, prilyginamas 0 (Wiheraari 2005).

1.1. Biomasės tipai

Biomasė yra labiausiai paplitusi atsinaujinančios energijos rūšis. Siekiant pakeisti iškastinį kurą ir užtikrinti didelius energijos poreikius, pastaruoju metu daug dėmesio buvo skiriama tinkamų biomasės rūšių identifikavimui. Naudojamos biomasės rūšies pasirinkimas priklauso nuo energijos konversijos proceso ir formos, kuri reikalinga energijai gauti.

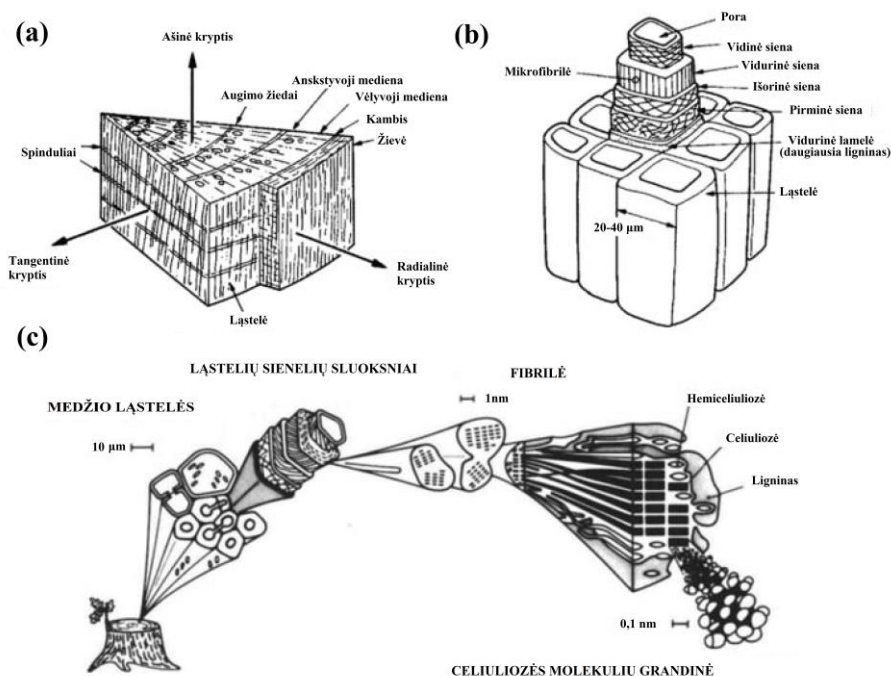
Tyrėjai įvairius biomasės tipus klasifikuoja skirtingai (Hoogwijk et al. 2003), tačiau pagal sudėtį biomasę galime suskirstyti į 4 pagrindines rūšis:

- Mediena ir jos produktai;
- Žoliniai augalai bei įvairios žolės;
- Vandens augalai;
- Dumblas.

Pirmiausia, remiantis drėgmės kiekiu biomasėje ir tik paskui jos rūšimi, pasirenkama energijos konversijos forma. Vandens augalai ir nuotekų dumblas yra iš esmės didelį drėgmės kiekį turinčios medžiagos, kurioms apdoroti priimtinausia technologija yra fermentacija. Mediena traktuojama kaip sausa biomasė, todėl energijos gamybai iš jos labiausiai tinkami tokie procesai kaip dujųifikacija, pirolizė ar deginimas. Žoliniai augalai skirstomi į augalus, turinčius didelį arba mažą drėgmės kiekį, todėl gali būti taikomi įvairūs energijos gamybos būdai (McKendry, 2002).

1.2. Medienos struktūra bei savybės

Mediena turi sudėtingą daugiaskluksnę struktūrą. Mikroskopiniame lygmenyje medieną sudaro ląstelės, atsakingos už medžiuose vykstančius procesus (1.1 pav.).



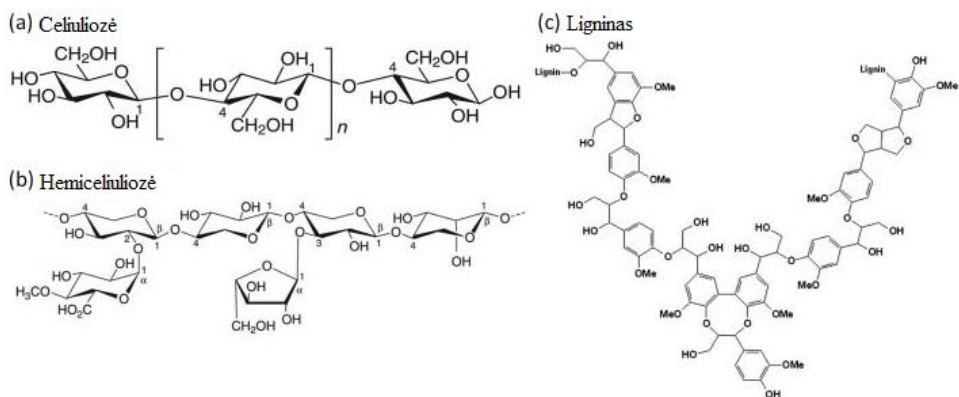
1.1 pav. Tipinė medienos struktūra: (a) medžio dalis makroskopiniame lygmenyje, (b) mikroskopiniame ląstelės lygmenyje ir (c) molekuliniame lygmenyje (Chan et al. 2018)

Makroskopiniame lygyje (1.1 a pav.) medieną sudaro pailgos tuščiavidurės ląstelės, vadinamos medienos ląstelėmis arba trachidais. Šios ląstelės turi storas lignino sienes. Medienos ląstelės išdėstytos išilgai kamieno ir baigiasi ties augimo žiedais, kurie formuojasi kiekvieną sezoną. Medžio augimas vyksta arčiausiai prie žievės esančiame sluoksnyje, kuris vadinamas kambium. Kuo didesnis tarpas tarp augimo žiedų, tuo mediena minkštesnė, kadangi tarp augimo žiedų esančios ląstelės sudaro celiuliozės pluoštą. Išorėje medienos stiebo sluoksnis susideda iš negyvų audinių ir vadinamas žieve, kuri yra kieta, kad apsaugotų vidinius medžio audinius. Ląstelių mikrostruktūra yra sudėtinga, ląstelių kryptis ir jų sluoksnių savybės lemia anizotropines mechanines medienos savybes (Brandt et al. 2010; Yamamoto 2002). Ląstelių sienelė yra polimerinė medžiaga, kuri susiformuoja fotosintezės metu fiksuojant aplinkoje esančią anglį CO_2 pavidalu ir kitų biocheminių procesų metu (Mansfield et al. 2016). Mikroskopiniame lygyje (1.1 b pav.) medienos ląstelių sienos turi daugiasluksnę struktūrą. Išorinis sluoksnis yra plokštelinis, kurį daugiausiai sudaro ligninas, kuris medienai suteikia tvirtumo, standumo bei kietumo (Ansell 2011). Vidinė trijų sluoksnių ląstelių siena sudaryta iš dviejų dalių: celiuliozės mikrofibrilių, kurios yra medienos ląstelių griaučiai, ir lignino bei hemiceliuliozės ir pektino, kurie sudaro minkštą ir platinį užpildą tarp celiuliozės mikrofibrilių (1.1 c pav.).

Ląstelės sienelės struktūra yra sudėtinga, tačiau iš esmės ją sudaro trys biopolimerai: celiuliozė (40–45 % sausos masės), hemiceliuliozė (25–35 %) ir

ligninas (20–30 %) (Stokke, Wu, Han 2013). Be polimerinių komponentų, medienoje gausu kitų junginių, kurie yra vadinami ekstrakcinėmis medžiagomis. Į pastarąsias įeina cukrūs, druskos, riebalai, pektinas, sakai ir t. t. Nors minėti junginiai sudaro vos kelis procentus visos medienos masės ($5 \div 10$ %), jie pasižymi dideliu poveikiu tam tikroms medienos savybėms (Green, Winandy, Kretschmann 1999).

Celiuliozė yra vienas iš pagrindinių medienos komponentų. Celiuliozė (β -1,4-gliukanas) – tai ilga molekulė, kurią sudaro gliukozės elementai (1.2 a pav.). Jos grandinės sudaro jungtys tarp hidroksilo grupių. Vandens molekulė su hidroksilo grupėmis gali jungtis vandenilinėmis jungtimis (Gardner, Blackwell 1974; Lynd et al. 2002; Rowell 2005), todėl hidroksilo grupės, esančios ant celiuliozės paviršiaus, yra atsakingos už reaktyvumą ir higroskopiškumą (Chan et al. 2018). Jungiantis vandens ir hidroksilo grupėms formuojasi 2–4 nm skersmens mikrofibrilės, kurias supa hemiceliuliozės pagrindo matrica (P. Basu 2010). Šios mikrofibrilės sudaro taisyklingus, lygiagrečius junginius, kurie suteikia celiuliozei kristališkumo, standumo bei cheminio atsparumo savybių, todėl vandens molekulė sunkiai įsiskverbia į kristalines celiuliozės sritis.



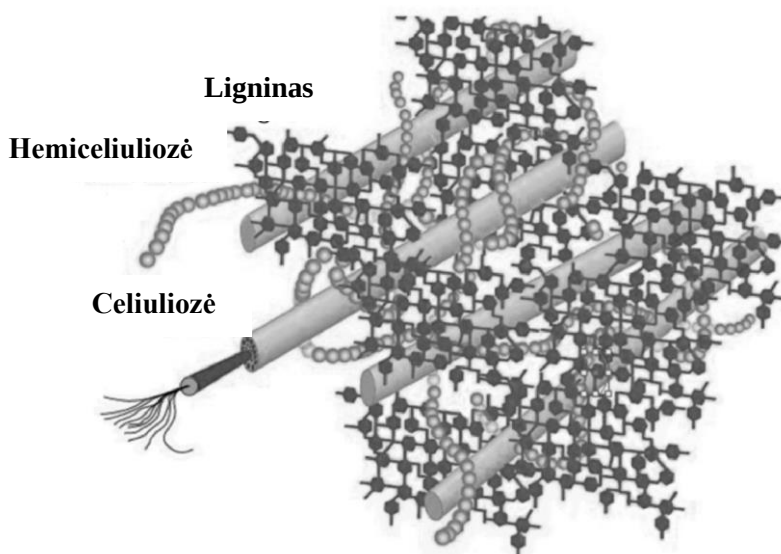
1.2 pav. Bendra cheminė ląstelės sienelės struktūra: (a) celiuliozės, (b) hemiceliuliozės ir (c) lignino (Chan et al. 2018)

Hemiceliuliozė sudaro trumpos grandinės kintančios struktūros polisacharidai (1.2 b pav.). Jos polimerizacijos laipsnis yra mažesnis nei celiuliozės (Mehrotra, Singh, Kandpal 2010). Augalų ląstelių sienelėse hemiceliuliozė siejasi su celiulioze ir ligninu (Faravelli et al. 2010). Lapuočių medienos hemiceliuliozėje gausu ksilano, tačiau gliukomanano kiekis čia yra mažas. Tuo tarpu spygliuočių medienos hemiceliuliozėje pasižymi mažu ksilano ir dideliu galaktogliukomanano kiekiu (LeVan, Jerrold, E. 1990).

Ligninas (1.2 c pav.) – tai labai šakotas ir retas polimeras, kurį sudaro kryžmiškai sujungti fenilpropanoidai, išgauti iš koniferilio, sinapilo ir p-kumarilo alkoholio fragmentų (Mehrotra, Singh, Kandpal 2010; Radotić et al. 2006). Ligninas, amorfinis polimeras, kuris tarsi klijai jungia celiuliozė ir hemiceliuliozė. Lignino elementuose gali formuotis įvairios jungtys, kurios lemia skirtingų tipų substruktūrų atsiradimą. Ligninas susipina ir kryžmiškai susijungia su kitomis ląstelių sienelėse

esančiomis makromolekulėmis. Ligninas pasižymi įvairiu poveikiu, įskaitant sienelių gniuždomosios jėgos didinimą (Gindl et al. 2001) bei medienos atsparumo mikrobams ir įvairiems grybeliniams susirgimams (Zwieniecki, Holbrook 2000).

Ląstelių sienelėse celiuliozės grandinės yra įsitvirtinusios amorfinių hemiceliuliozių ir lignino vidinėse struktūrose (1.3 pav.) (Gindl et al. 2001; Wang et al. 2017). Celiuliozė – tai kristalinė medienos dalis, tuo tarpu hemiceliuliozių ir lignino struktūros yra amorfinės (Wikberg, Maunu 2004; Yildiz, Gümüşkaya 2007). Kristalinė celiuliozė išsidėsčiusi mikrofibrilėse, kurias sudaro celiuliozės fibrilės (Brandt et al. 2010). Pagrindinė mechaninė hemiceliuliozių ir lignino funkcija – suteikti atramą celiuliozės fibrilėms. Nors ląstelės sienelės stiprumo savybės glaudžiai siejamos su celiuliozės fibrilėmis ir mikrofibrilėmis, manoma, kad hemiceliuliozė – lignino karkasas taip pat atlieka svarbų vaidmenį medienos stiprumo kontekste (Boonstra, Blomberg 2007).



1.3 pav. Celiuliozės, hemiceliuliozės ir lignino išsidėstymas biomasės ląstelėse (Wang et al. 2017)

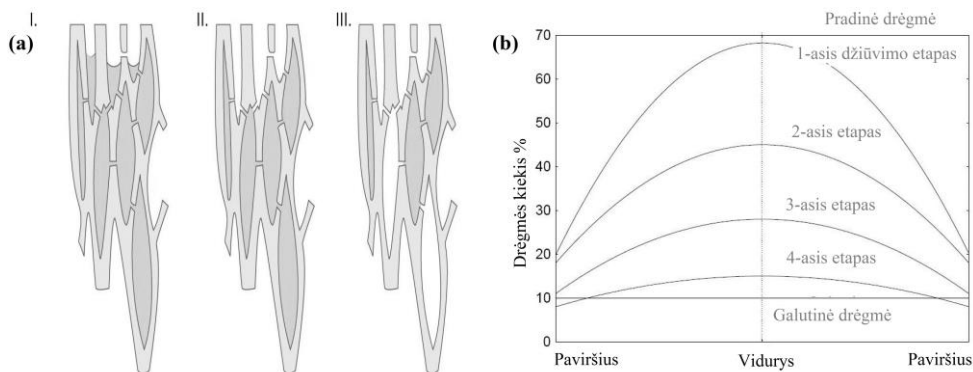
Kaip jau minėta, mediena sudaryta iš pailgos formos ląstelių, kurių ašys eina išilgai kamieno. Ląstelių sienelėse esantys maži tarpeliai bei ląstelių ertmės (poros) (1.1b pav.) sudaro kapiliarinę sistemą, kuria juda vanduo ir neorganiniai junginiai. Vanduo biomasėje aptinkamas trijų formų: higroskopinis (surištasis) vanduo, laisvasis (kapiliarinis) vanduo ir vandens garai (Simoneit 1999). Higroskopinis vanduo kaupiasi ląstelių sienelėse – vandenilis sąveikauja su hemiceliuliozės ir celiuliozės hidroksilo grupėmis. Susikaupusio vandens kiekiai lignine, celiuliozėje ir hemiceliuliozėje skirtingi, lignine vandens absorbcija siekia iki 10 % bendrosios masės, kai hemiceliuliozėje ir celiuliozėje – iki 50 % bendrosios masės (Kulasinski 2015). Vandens kaupimąsi riboja sorbcijos zonos (Anca-Couce 2016). Laisvasis vanduo ir garai kaupiasi biomasės tuštumoje arba lumenuose, veikiamas tik silpnų kapiliarinių jėgų, todėl išsiskyręs kapiliarinis vanduo nelemia biomasės plėtimosi ar susitraukimo. Medienoje surištojo vandens priklausomai nuo rūšies būna iki 30 %

pagal masę. Biomasei netenkant drėgmės, pirmiausiai intensyviai garuoja laisvoji (kapiliaruose esanti) drėgmė, paskui pradeda garuoti surištoji drėgmė (higroskopinis vanduo).

Aplinkoje laikoma mediena gali drėkti, džiūti arba joje esantis drėgmės kiekis gali nekisti. Maksimalus nusistovėjęs drėgmės kiekis, kurį sugeria mediena, vadinama ląstelių sienelių sotinimo riba arba medienos higroskopiškumo riba (Ross, USDA Forest Service. 2010). Visų medžio rūšių higroskopiškumo riba neviršija 30 % masės (esant 15–20 °C aplinkos temperatūrai), tai yra tiek, kiek medienoje gali būti surištojo vandens. Viršijus higroskopiškumo ribą, laisvasis vanduo pradeda tekėti į medienos ląstelių angas. Mediena yra higroskopinė ir hidrofilinė medžiaga, kuri gali absorbuoti arba išskirti drėgmę taip, kad būtų pasiektas pusiausvirasis drėgnumas. Medienos pusiausvirasis drėgnumas priklauso nuo vietos klimato bei aplinkos temperatūros ir akivaizdžiai skiriasi laikant ją vidaus bei lauko sąlygomis (Rémond, Passard, Perré 2007).

Medienos drėgmės išsiskyrimo procesas prasideda iškart nukirtus medį. Kaip keičiasi vandens kiekis džiūstant medienai, pavaizduota 1.4 a pav., kur I, II ir III rodo drėgmės kiekį tam tikru laiko momentu (Cserta 2012).

Pradiniame medienos drėgmės išsiskyrimo etape kapiliarinės jėgos stumia laisvąjį vandenį į medienos paviršių ir pasišalina į supančią atmosferą. Šis procesas tęsiasi tol, kol ląstelių sienelių įsotinimas sumažėja iki nulio. Šiame etape medienoje nelieka laisvojo vandens, tačiau ji vis dar prisotinta surištoju vandeniu. Išgaravus visam laisvajam vandeniui, pradeda garuoti ir surištasis vanduo. Dėl garavimo sumažėja paviršiaus temperatūra. Norint išdžiovinti medieną, būtina perduoti šilumą iš aplinkos (Cserta 2012). Drėgmės išsiskyrimo proceso pabaigoje mediena pasiekia pusiausvirąją būseną su aplinka (Rémond, Passard, Perré 2007). Galutinis drėgmės kiekis priklauso nuo aplinkos temperatūros ir aplinkos drėgmės. Drėgmės kiekio kitimas konvekciniu džiovinimu metu nuo ką tik nukirstos medienos iki pusiausvriosios būsenos, esant 10 % drėgnumui, pavaizduotos 1.4 b pav.

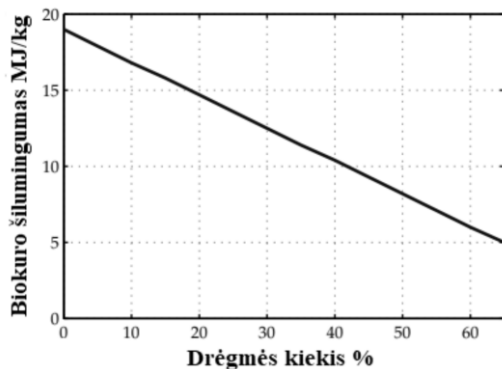


1.4 pav. Drėgmės kiekio mažėjimas medienoje: (a) difuzinis ir kapiliarinis drėgmės išsiskyrimas I, II ir III ; (b) konvekcinis drėgmės išsiskyrimas nuo šviežiai nukirsto medžio iki pusiausvriosio 10 % masės drėgnumo (Cserta 2012)

Medienos drėgmės kiekio kitimui įtakos turi šilumos ir masės mainai tarp aplinkos ir medienos, kuriuos riboja sudėtingi drėgmės pernašos procesai medienos

viduje. Vanduo medienoje juda kaip skystis arba garai. Judėjimo kelias priklauso nuo varomosios jėgos (pvz., slėgio arba drėgmės gradiento) pobūdžio ir medienos struktūros (Haque 2002; Yamamoto 2002; Younsi et al. 2007).

Biomasėje esantis drėgmės kiekis yra svarbus parametras, kuris apsprendžia energetinį jos potencialą (Niedermayr et al. 2015). Energijos kiekis medienoje (šilumingumas) yra atvirkščiai proporcingas vandens kiekiui joje (1.5 pav.) (Merlan et al., 2016). Šviežiai nupjauta ir nesmulkinta mediena, laikoma atvirai, per mėnesį praranda iki 5% drėgmės (Krigstin et al., 2016), todėl medienos energetiniam panaudojimui labai svarbu dirbtinio drėgmės išsiskyrimo koncepcijos, drėgmės kiekio nustatymo metodai bei medienos džiovinimo mechanizmo analizė.



1.5 pav. Biokuro šilumingumas priklauso nuo jame esančio drėgmės kiekio (Merlan et al., 2016)

1.3. Drėgmės kiekio biokure nustatymo metodai

Biokuro katilinėse šilumos energijai gauti deginama mediena yra gaunama smulkinant miškų kirtimo atliekas, lentpjūvių atliekas, miestų bei miškų tvarkymo atliekas. Į katilines tiekiamos medienos drėgmės kiekis gali kisti nuo 30 iki 60 % pagal masę. Kuo drėgmės kiekis medienoje didesnis, tuo labiau sudėtingesnis jos tiesioginis deginimas biokuro pakurose dėl reikalingo papildomo energijos kiekio jai išgarinti.

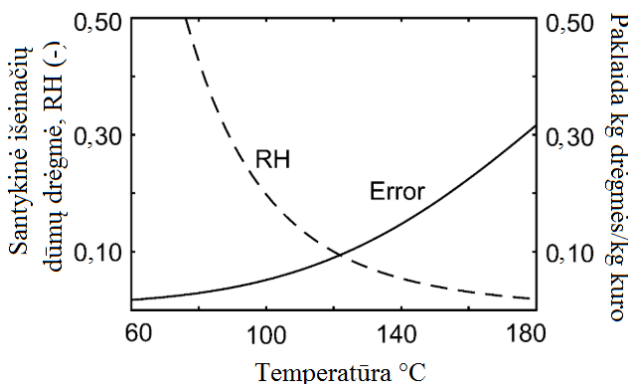
Paduodamo į pakurą smulkintos medienos biokuro drėgmės kiekį galima nustatyti tiesioginio matavimo būdu arba tiriant išmetamų dūmų drėgnumą. Tiesiogiai matuojamo į katilinę tiekiamo biokuro drėgmės kiekis nustatomas džiovinant bandinį laboratorinėse džiovyklose (Nyström, Dahlquist 2004). Tačiau drėgmės kiekio nustatymas šiuo metodu trunka nuo 4 iki 16 h. Siekiant užtikrinti stabilų pakuros veikimą, toks drėgmės kiekio biokure matavimas yra per ilgas, todėl ir šio metodo pritaikymas automatiniam ir nepertraukiamam pakuros darbui yra neįmanomas. Automatinė pakuros valdymo sistema turėtų reaguoti greitai, vos per kelias sekundes ar minutes, ir atitinkamai reaguoti į kintančius biokuro parametrus, gautus atliekant matavimus realiu laiku.

Galima išskirti kelis tiesioginius biokure esančio drėgmės kiekio nustatymo metodus: mikrobangų ir branduolinis magnetinis rezonansas (Nyström, Dahlquist 2004), (Trabelsi, Paz, Nelson 2013), artimo infraraudoniesiems spinduliams diapazono spektroskopija (NIR) (Lestander, Rhén 2005), radijo bangų (Daassi-Gnaba et al. 2017) ir rentgeno spindulių spektroskopija (Dahlquist 2013). Mikrobangų ir

branduolinio magnetinio rezonanso metodai labiau tinka laboratoriniam nei pramoniniam naudojimui, nes yra ypatingai brangūs, tad naudoti mažos ar vidutinės galios katilinėse ekonomiškai nenaudinga (Neonila, Zibtsev 2010). Naudojant NIR metodą, biokuro paviršius veikiamas 800–2500 nm ilgio bangomis, o gautoje absorbcijos kreivėje aptinkami trys maksimumai, būdingi vandens molekulei (Tsuchikawa 2007). Švedijos mokslininkų teigimu (Axrup, Markides, Nilsson 2000), NIR metodas yra tinkamas matuoti tiekiamos į pakurą žievės ir smulkintos medienos drėgmę. Tačiau turi ir trūkumą – kintant kuro savybėms, pavyzdžiui, tankiui, sudėčiai, dalelių dydžiui, NIR sistemą būtina kalibruoti iš naujo. Daassi-Gnaba ir kt. (Daassi-Gnaba et al. 2017) pasiūlė drėgmės nustatymo metodą, pagrįstą radijo bangų matavimu. Šio metodo metu būtina įvesti matavimo jutiklį į smulkintos medienos biokurą. Rezultatais nustatyta, kad šis metodas tinka matuoti biokuro drėgmės kiekį katilinėje realiu laiku, tačiau pramoninis prototipas vis dar yra bandymų stadijoje. Niedermayr ir kt. (Niedermayr et al. 2015) pristatė novatorišką biokuro padavimo sistemą – griebtuvą, kuriame sumontuoti įvairūs jutikliai, tokie kaip ultragarso, drėgmės ir vaizdo kamera. Jutiklius turintis griebtuvas matuoja sandėlyje esančio smulkintos medienos biokuro savybes ir tiekia jį į pakurą tam tikros drėgmės bei reikiamu greičiu pagal iš anksto užduotą katilo veikimo režimą. Šis metodas padeda išvengti katilo darbo režimų svyravimo, atsirandančio dėl skirtingo biokuro drėgmės kiekio. Ši padavimo sistema yra tik laboratorinio lygmens ir buvo išbandyta tik šiluminėje elektrinėje, kurios galia mažesnė kaip 500 kW (Niedermayr et al. 2015).

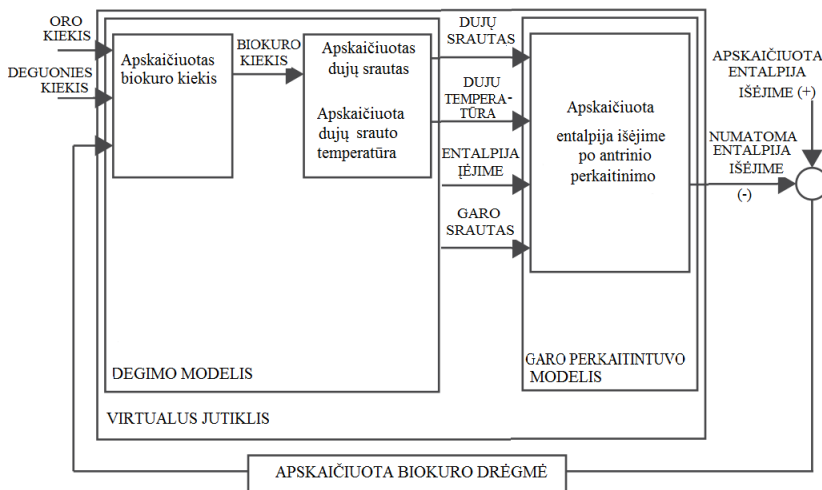
Aptarti biokuro drėgmės kiekio matavimo metodai (Nyström, Dahlquist 2004; Trabelsi, Paz, Nelson 2013; Lestander, Rhén 2005; Daassi-Gnaba et al. 2017; Dahlquist 2013; Neonila, Zibtsev 2010; Tsuchikawa 2007; Axrup, Markides, Nilsson 2000; Niedermayr et al. 2015) dėl savo kainos nėra naudojami mažose ir vidutinio galingumo (5–10 MW) biokurą deginančiose šildymo jėgainėse. Be to, naudojant šiuos metodus, būtinas įrangos derinimas ir kalibravimas bei matavimų vykdymo įgūdžiai (Aulin, Karlsson 2008). Dėl šios priežasties, netiesioginiai metodai, kuriuos pasitelkus biokuro drėgmės kiekis įvertinamas analizuojant išmetamąsias dujas, yra tinkamesni ir ekonomiškai patrauklesni. Tokie metodai yra: Furjė infraraudonųjų spindulių technologija (FT-IR) (Bak, Clausen 2001), reguliuojama diodų lazerinė spektroskopija (Bolshov, Kuritsyn, Romanovskii 2015), santykinės drėgmės jutiklis (RH) (Hermansson, Lind, Thunman 2011) ir matavimai virtualiais jutikliais (Jaakkola et al. 1998). Kortela J. ir Jämsä-Jounela S. L. (Kortela, Jämsä-Jounela 2013) analizavo drėgme prisotintas dujas, naudodami FT-IR dujų analizatorių. Rezultatai parodė, kad išmatuotas drėgmės kiekis skiriasi nuo esančio kure iki 4,1 %, tačiau toks rezultatas buvo gautas analizuojant švarias dujas. Šiuo prietaisu matuojant drėgmės kiekį katilinės dūmtakio kanale, dėl kietųjų dalelių išmetamuosiuose dūmuose, taip pat dėl slėgio ir temperatūros įtakos yra gaunami netikslūs rezultatai. Tikslesnius rezultatus galima gauti naudojant reguliuojamo lazerinio diodo spektroskopiją, tačiau šie matavimo prietaisai yra brangesni nei FT-IR, taip pat būtinas nuolatinis diodų valymas bei matavimų vykdymo įgūdžiai (Lackner 2007). Kitas netiesioginis drėgmės matavimo metodas yra santykinės drėgmės jutiklis (Ikonen, Stormbom, Ranta-aho 2006). Hermansson ir kt. (Hermansson, Lind, Thunman 2011a) atliko analizę šio metodo tikslumui padidinti (metodo paklaida <4 %) sumažinant signalo delną ir tokiu

būdu padidinti RH jutklio pritaikymo galimybes, kad būtų galima išmatuoti drėgmės kiekį išeinančiuose dūmuose deginant biokurą, siekiant nustatyti kuro drėgmės kiekį. Kadangi jutiklis gali veikti tik iki 200 °C temperatūroje (1.6 pav.), prieš atliekant matavimus, išmetamųjų dūmų kanalas buvo atšaldytas. Taikant šį metodą galima nustatyti drėgmės kiekio pokyčius per kelias sekundes; tačiau, norint taikyti šį metodą medieną kūrenančiuose katiluose, reikalingi nauji – patobulinti prietaisai, matavimai ir kalibravimas.



1.6 pav. Apskaičiuoto kuro drėgmės kiekio paklaida ir priskirtinas santykinės drėgmės matavimas įprasto biokuro (Hermansson, Lind, Thunman 2011a) išmetamoms dujoms, kurių drėgmės kiekis 20 %

Kortela J. ir Jämsä-Jounela S. L. (Kortela, Jämsä-Jounela 2013) pristatė virtualų jutiklį (1.7 pav.), skirtą biokuro drėgmės tiesioginiam stebėjimui BioPower 5 CŠT jėgainėje, kur vandens garų gamyba vyksta deginant biokurą (žievę, pjuvenas ir granules).



1.7 pav. Loginė virtualaus jutiklio schema (Kortela, Jämsä-Jounela 2013)

Metodas paremtas degimo galios įvertinimu naudojant degimo proceso modelį ir papildomai sistemoje įdiegto garų perkaitintuvo dinaminį modelį, kur biokuro drėgmės kiekis išskaičiuojamas iš išmatuotų ir įvertintų papildomo garų perkaitintuvo entalpijų skirtumo. Kad išbandytų biokuro drėgmės virtualų jutiklį, autoriai taip pat atliko eksperimentinius tyrimus deginant eglės žievę (drėgmės kiekis 54 % pagal masę) ir sausą smulkintą medieną (drėgmės kiekis 20 % pagal masę). Tyrimų metu biokuro drėgmei nustatyti naudojo FT-IR jutiklį, kuris, esant maždaug 22 minučių delsai, biokuro drėgmės kiekį nustatė su 3,6 % paklaida. Tyrėjų teigimu, paklaida atsirado dėl biokuro parametrų pokyčių ir išmetamųjų dūmų sudėties kitimo.

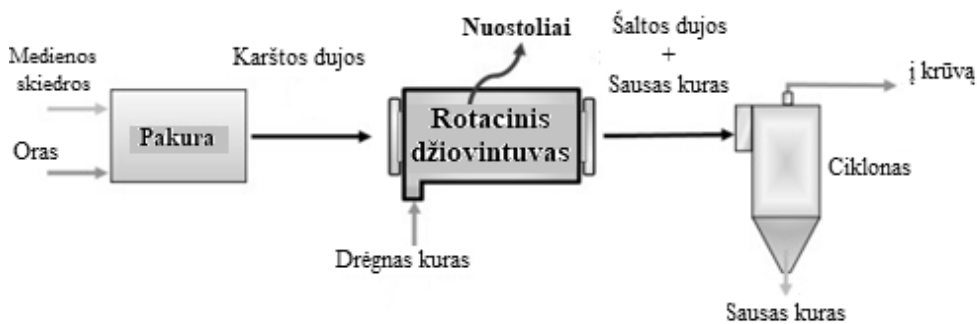
Aptarti biokuro drėgmės kiekio matavimo metodai turi savo privalumų ir trūkumų. Iki šiol sukurti metodai reikalauja papildomų priemonių, kalibravimo ir techninės priežiūros. Be to, yra per brangūs naudoti mažose ir vidutinio dydžio biokurą deginančiose katilinėse, kuriose įrengtas kondensacinis ekonomaizeris.

1.4. Biokuro drėgmės išsiskyrimo principai bei technologijos

Šaltuoju sezonu, išaugus šilumos gamybos poreikiui, į katilines neretai tiekama ir šviežiai nupjauta smulkinta mediena, kurioje yra daugiau kaip 50 % pagal masę drėgmės. Biokuro gamintojai neturi sąlygų sandėliuoti didelių kiekių nupjautos bei susmulkintos medienos, kad sumažintų drėgmės kiekį prieš tiekiant ją į deginimo jėgaines. Tad tiesioginis deginimas biokuro pakurose yra sudėtingesnis ir reikalaujantis papildomos energijos drėgmei iš biokuro išgarinti.

Šiuolaikiniai suprojektuoti katilai su ardyninėmis pakuromis pakankamai aprūpinti stebėjimo sistemomis (Paces, Kozek 2011). Tačiau šiuolaikinių valdymo sistemų pritaikymas, deginant prastos kokybės, drėgną biokurą katiluose su ardyninėmis pakuromis, vis dar nėra ištobulintas. Įrenginiai, gaminantys šilumą iš sauso biokuro, yra suprojektuoti taip, kad gautų aukštą šiluminį efektyvumą su mažomis išmetamųjų dujų teršalų (CO, NO_x ir pan.) koncentracijomis (Bauer et al. 2010). Tačiau, jei į įmonę pristatyta biokuras nėra tiksliai apibrėžto drėgnumo, nustatyti pakuros parametrai nėra tinkami stabiliam ir optimaliam biokuro degimui pakuroje. Atkeliaujantis į įmonės biokuras paprastai yra skirtingų savybių medienos mišinys, pavyzdžiui, eglės žievės ir sausų medienos skiedrų, sausų spyglių ir drėgnų miško kirtimo atliekų. Šio biokuro drėgmės kiekis dažnu atveju svyruoja nuo 30 % iki 55 % pagal masę, o tai nulemia energijos kiekio neapibrėžtumą ir apsunkina automatinį deginimo įrenginių darbą (Hermansson, Lind, Thunman 2011). Norint išvengti degimo proceso parametrų kitimo, biokurą, prieš tiekiant į kūryklą, reikėtų tinkamai paruošti, t. y. susmulkinti ir išdžiovinti iki (tinkamo) reikiamo drėgnumo. Priverstinis drėgmės išsiskyrimas iš biokuro reikalauja papildomų energetinių resursų.

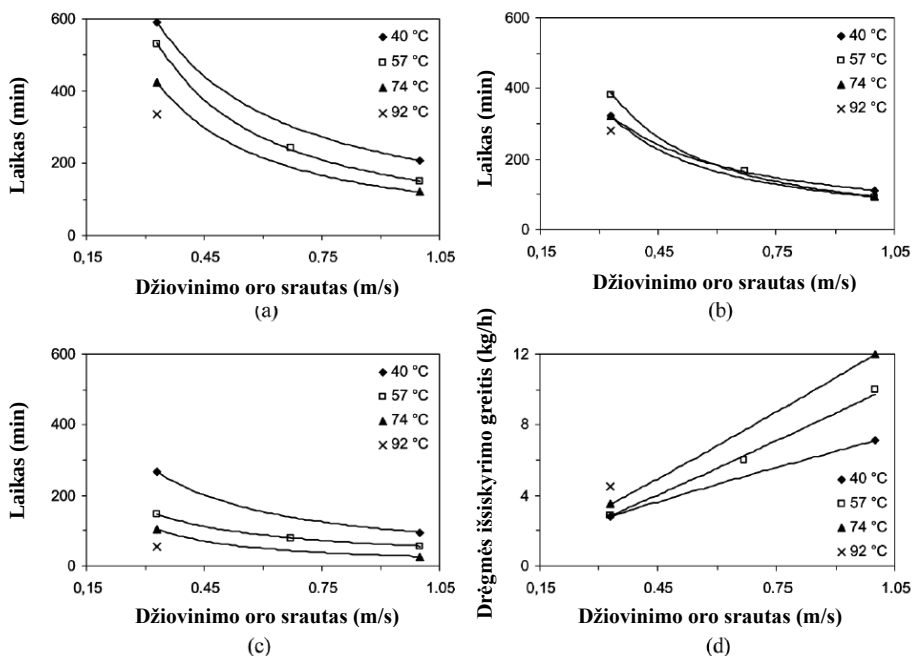
Daugelyje pramonės įmonių susidaro atliekinė šiluma, kuri prarandama atiduodant ją į aplinką (1.8 pav.) (Bengtsson 2015; Silva et al. 2021). Šią susidarančią atliekinę šilumą galima būtų panaudoti išskiriant drėgmę iš biokuro, kuris vėliau būtų naudojamas kaip žaliava deginimo ar dujinimo procesuose.



1.8 pav. Biokuro drėgmės išsiskyrimo proceso schema (Silva et al. 2021)

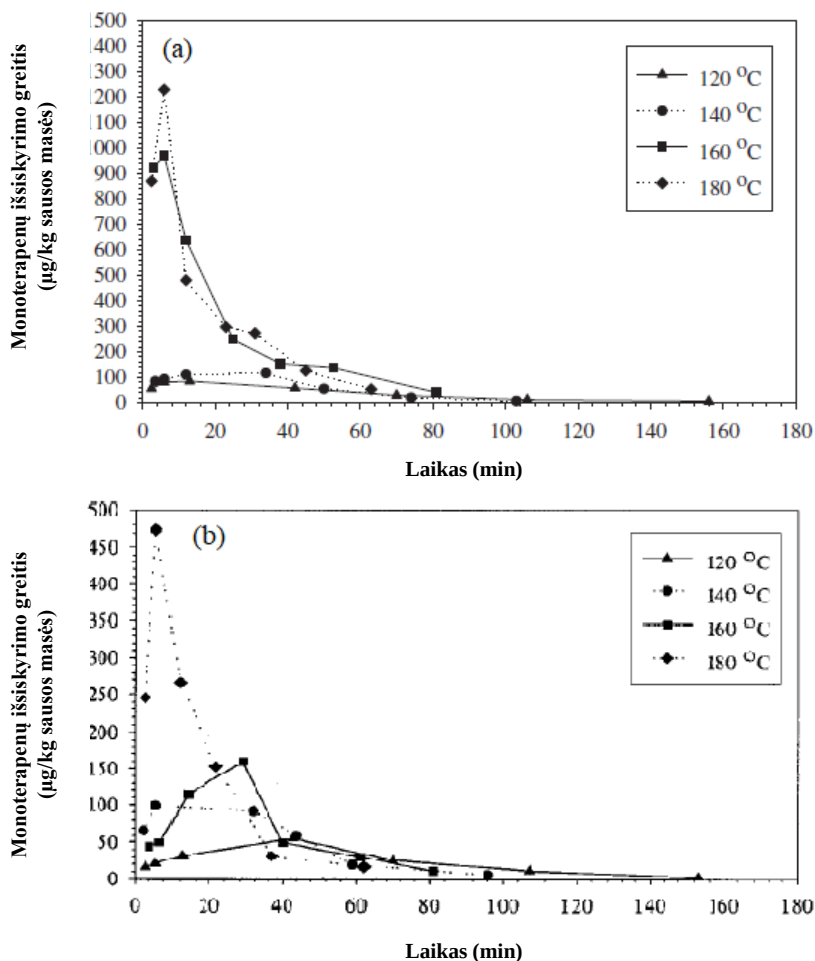
Egzistuoja keli biokuro džiovyklų tipai: perkaitinto garo (Stenström, 2017), konvejerinės džiovyklos, vienos ar kelių pakopų, su stacionariu ar judančiu pagrindu (Daud 2008; Pang, Mujumdar 2010), sukamosios-rotacinės džiovyklos (Wimmerstedt 1999; Sai 2013), verdančio sluoksnio ir t. t. Tačiau daugiausiai pramonėje paplitusios sukamosios-rotacinės džiovyklos. Ieškant veiksmingiausio drėgmės išsiskyrimo iš biokuro būdo, kaip priimtiniausią ir efektyviausią Y. Liu ir kiti (Liu et al. 2014) išskyrė džiovinimą verdančiame sluoksnyje. Šis biokuro drėgmės išskyrimo būdas gali būti pasirenkamas tada, kai reikalinga kompaktiška džiovykla, o džiovinimo medžiaga – labai smulkus biokuras, pvz., medžio pjuvenos.

Švedijos universiteto mokslininkas tyrė ir savo darbe aprašė žemų temperatūrų biokuro džiovinimo procesą (Bengtsson 2015). Drėgno biokuro drėgmės išsiskyrimo eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti stacionaraus sluoksnio džiovinimo kameroje. Tyrimo metu buvo nustatyti pastovaus drėgmės išsiskyrimo greičio ir mažėjančio drėgmės išsiskyrimo greičio periodai (jų pradžia ir pabaiga). Atlikti tyrimai parodė (1.9 pav.), kad, esant pastoviam drėgmės išsiskyrimo greičio periodui, sumažinus paduodamo oro srautą, 40 % drėgmės išsiskyrimo periodas pailgėja 18–42 %, o sumažinus džiovinimo oro temperatūrą, 40 % drėgmės išsiskyrimo periodas pailgėja 41–69 %. Mažėjančio drėgmės išsiskyrimo greičio periodui didelę įtaką turi paduodamo oro srautas. Jį sumažinus, 40 % drėgmės išsiskyrimo periodas prailgėja 17–21 %, o sumažinus džiovinimo oro temperatūrą, 40 % drėgmės išsiskyrimo periodas pailgėja tik 53–72 %. Remiantis atliktais tyrimais ir įvertinus įdiegtoje biokuro džiovinimo technologijoje pastovaus drėgmės išsiskyrimo greičio ir mažėjančio drėgmės išsiskyrimo greičio periodus, galima sumažinti energijos sąnaudas iki minimumo.



1.9 pav. Džiovinimo laikas: (a) pastovus drėgmės išsiskyrimo greičio periodas; (b) mažėjantis drėgmės išsiskyrimo greičio periodas; (c) drėgmės išsiskyrimo greitis, esant pastoviam drėgmės išsiskyrimo periodui; (d) paduodamo džiovinimo oro srauto priklausomybė nuo drėgmės išsiskyrimo greičio, esant skirtingoms oro temperatūroms (Bengtsson 2015)

Naudojant perkaitintų garų džiovyklas, drėgnas biokuras sumaišomas su tam tikru kiekiu perkaitinto garo, kad medžiaga optimaliai išskirtų drėgmę ir susidarytų sotieji garai (Li et al. 2012). Nors ši sistema, palyginti su kitomis taikomomis drėgmės išskyrimo proceso sistemomis, pasižymi aukštu energetiniu našumu ir maža gaisro rizika, tačiau ji turi ir trūkumų. Ši džiovykla netinka medienos skiedroms, nes reikia didelių investicinių išlaidų, be to, kyla nuotekų valymo problemų (H. Li et al., 2012; Pang et al., 2010; Stenström, 2017). Nejudančio sluoksnio, rotacinės ir pneumatinės džiovinimo sistemos yra paprastesnės už perkaitinto garo džiovinimo sistemas, nes džiovinimo agentas yra pašildytas oras, o sistemos konstrukcija tinkama medienos skiedroms džiovininti (Pang, Mujumdar 2010). Nejudančio (stacionaraus) biokuro sluoksnio džiovyklų trūkumas yra jų dydis. Rotacinėse džiovyklose naudojamas aukštos temperatūros džiovinimo oras – nuo 200 iki 500 °C, todėl kyla didesnis gaisro pavojus (Pang, Mujumdar 2010). Be to, Danielssonas ir Rasmusonas (Danielsson, Rasmuson 2002) tyrė lakiųjų organinių komponentų išsiskyrimą drėgmės išsiskyrimo proceso metu. Rezultatai parodė, kad veikiant biokurą oru, kurio temperatūra viršija 100 °C, iš dalies prarandama dalis energijos dėl monoterapenų išsiskyrimo (1.10 pav.).

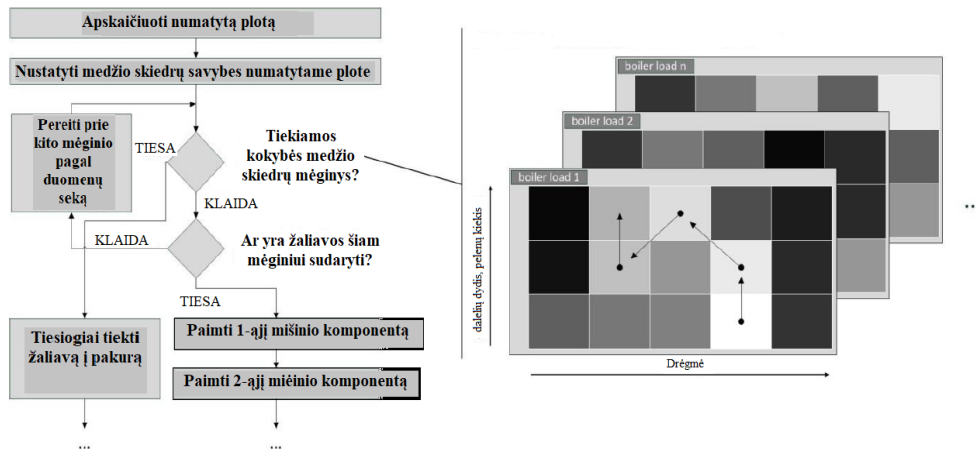


1.10 pav. Monoterapenų išsiskyrimas veikiant (a) pušies ir (b) eglės skiedras su 120 °C, 140 °C, 160 °C ir 180 °C temperatūros oru (Danielsson, Rasmuson 2002)

Aptarti moksliniai tyrimai parodė, kad, siekiant tinkamo tiekiamo į pakurą biokuro drėgnumo, turi būti atsakingai parenkama džiovinimo technologija, atsižvelgiant į energijos suvartojimo efektyvumą, gaisro pavojų ir drėgmės išsiskyrimo metu išmetamų teršalų kiekį. Įvertinus privalumus ir trūkumus, galima teigti, kad džiovinimo įrenginiai gali būti eksploatuojami tik mažose ir vidutinio dydžio šilumos gamybos įmonėse bei yra ribotai pritaikomi skirtingo drėgnumo smulkintos medienos biokuroi džiovinti.

Drėgnam biokuroi sudeginti reikia daugiau energijos, kadangi vandenį, esantį biokure, reikia išgarinti, todėl ne visuose šildymo katiluose, deginančiuose biokurą, racionalu diegti džiovinimo sistemą. Kaip alternatyvą biokuro džiovinimui F. Niedermayer ir kiti (Niedermayer et al. 2015) pasiūlė inovatyvią biokuro paruošimo sistemą. Siekiant išvengti papildomų energijos sąnaudų dėl biokuro drėgmės išsiskyrimo, tyrėjai išmanioju griebtuvu pagal kuro savybes suskirstė biokuro

saugojimo sandėlių zonomis ir sudarė algoritmą, kuris suteikia galimybę paduoti reikiamo drėgnumo ir kaloringumo kurą į pakurą optimaliam sudeginimui (1.11 pav.). Jei katilo apkrova yra didelė, pakuros temperatūra yra aukštesnė, o tai padeda intensyviai degimo procesą naudojant drėgną biokurą. Kita vertus, kai katilo apkrova yra maža, atsižvelgiant į katilo efektyvumą ir dujų emisijas, katilui sudarytas algoritmas leidžia išvengti katilo parametrų netolygumų tinkamai paruošiant biokurą. Tačiau pasiūlytas sprendimas yra brangus bei reikalaujantis biokuro sandėliavimo uždaroje patalpoje.



1.11 pav. Supaprastintas tiesioginio biokuro tiekimo algoritmas (kairėje pusėje) ir bandinio paruošimo algoritmas (dešinėje pusėje). (Niedermayr et al. 2015)

1.5. Biokuro deginimo technologijos

Daugelį metų mediena buvo vienas pagrindinių energijos šaltinių, naudojamų šilumos energijai gauti. Šiandien medienos deginimas yra vienas iš būdų kovoti su klimato kaita bei pasiekti viso pasaulio šalių 2014 m. pasirašytą, o 2020 m. atnaujintą Paryžiaus susitarimą dėl išmetamųjų teršalų kiekio sumažinimo.

Deginimui naudojama įvairių rūšių ir pavidalo mediena: rąstai, medžių skiedros, granulės, briketai ir t. t. Rąstai nėra geriausias pasirinkimas automatinėms medienos deginimo sistemoms dėl jų matmenų. Be to, dėl nedidelio paviršiaus ploto ir tūrio santykio rąstų tiesioginis degimas nėra efektyvus. Rąstai iš pradžių susmulkinami, džiovunami, po to medienos skiedros ir pjuvenos presuojamos, gaminamos granulės ar briketai. Briketai ar granulės yra medienos gaminy, kurių charakteristikos (pvz., drėgmė ir šilumingumas) reglamentuojamos bei gali kisti tik tam tikrose ribose. Dėl šios priežasties jų pagaminimas reikalauja didesnių energijos sąnaudų ir yra brangesnės, o tai mažina jų patrauklumą industrinių katilų eksploatuotojams. Lyginant medienos rąstus ir smulkintą medieną, akivaizdu, kad iš rąstų pagamintos granulės ar briketai yra geresnis pasirinkimas deginant automatinėse pakurose, kadangi tai stabilus biokuras su pastoviu drėgmės bei energijos kiekiu, toks kuras yra deginamas efektyviai bei saugiai (Merlan et al. 2016b; Deboni et al. 2020; Zhao et al. 2021). Smulkintos medienos biokuras paprastai būna miško medžių tvarkymo, energetinių

augalų arba net baldų gamybos proceso atliekos ar miško paklotas. Kadangi nenaudojami papildomo paruošimo procesai, tokie, kaip presavimas ar džiovinimas prieš deginimą, todėl jų kaina yra ženkliai mažesnė. Medienos skiedros taip pat yra patrauklios dėl to, kad gali būti gaminamos miške ir iš gamybos vietos gali būti tiesiogiai gabenamos šilumos gamintojui.

Priklausomai nuo šilumos poreikio, biokuroi deginti naudojamos dvi pagrindinės technologijos: deginimas verdančio sluoksnio pakurose (nuo 20 MW iki 500 MW) ir deginimas pakurose su ardynu (iki 100 MW) (Williams et al. 2012). Katiluose su verdančio sluoksnio pakuromis gali būti naudojamas įvairios rūšies biokuras, kurio drėgmės kiekis 60 % ir daugiau pagal masę (Zhang, Xu, Champagne 2010). Tuo tarpu katiluose su ardyninėmis pakuromis sunku deginti smulkintą medieną, kurios drėgmės kiekis didesnis nei 55 % (Sefidari, Razmjoo, Strand 2014). 1.1 lentelėje palygintos ir apibendrintos pagrindinės šių technologijų savybės. Nepaisant išvardintų trūkumų, tokiose mažose šalyse kaip Lietuva, katilai su ardyninėmis pakuromis labiausiai paplitę mažose ir vidutinio dydžio katilinėse, kuriose pagaminta šiluma vartojama centralizuotam šildymui. Siekiant patenkinti centralizuoto šilumos tiekimo sistemų reikalavimus ir išgauti aukštą šilumos efektyvumą ir mažas dujinių teršalų emisijas (CO, NO_x ir t. t.), deginant biokurą, kurio drėgmės kiekis 30–55 % pagal masę (Razmjoo et al., 2016), yra sukurti šiuolaikiniai katilai su judančiu ardynu. Nors šie katilai aprūpinti pažangiais parametru matavimo prietaisais, kintantis biokuro drėgmės kiekis gali sukelti biokuro deginimo katilų eksploatavimo problemas, tokias kaip: žemą degimo stabilumą ir nepakankamą šilumos tiekimą, esant dideliui šilumos poreikiui (Svoboda et al. 2009). Šių problemų nesunkiai galima išvengti reguliuojant katilo darbo režimą, jei yra žinomos tiekiamo į pakurą biokuro savybės arba bent jau jame esančios drėgmės kiekis.

1.1 lentelė. Biokuro deginimo technologijų palyginimas (Duffy 2012)

	Degimas stacionariame sluoksnyje	Degimas verdančio sluoksnio katiluose	
		BVS (burbuliuojantis verdantis sluoksnis)	CVS (cirkuliuojantis verdantis sluoksnis)
Kuro dalelių dydis [mm]	<50	<80	<40
Katilinės galingumas [MW _{th}]	<20	>20	>30
Deginimo temperatūra [K]	1350–1650	1050–1200	1050–1200
Pirminio oro greitis [m/s]	0,1–1,2	1,2–3,6	3,6–10
Perteklinis deguonis [%]	6–8	3–4	1–2
Drėgmės kiekis [% pagal bendrą masę]	<55	<65	<65
Ekspluatacinės išlaidos	mažos	didelės	didelės
Pagrindinė problema	Nevienodas degimas	Jautrus aglomeracijai ir užsiteršimui sluoksnyje	

Deginimo verdančiame sluoksnyje technologija atliekoms deginti naudojama jau nuo 1960-ųjų. Verdantio sluoksnio katiluose kuras sumaišomas su inertine

medžiaga (pvz., kvarcinis smėlis) ir deginamas virš perforuotos plokštės, per kurią paduodamas degimui reikalingas pirminis oras. Priklausomai nuo pirminio oro pseudovirimo greičio, procesas gali būti priskirtas deginimui burbuliuojančiame verdančiame sluoksnyje (BVS) arba cirkuliuojančiame verdančiame sluoksnyje (CVS). BVS pakuros veikia, kai oro greitis yra pakankamas, kad būtų sukeltas biokuro sluoksnio pseudovirimas, tačiau per mažas kietosioms dalelėms išsiveržti iš sluoksnio. CVS pakurose oro greitis didesnis nei BVS, o tai sukelia smulkesnių sluoksnio dalelių išnešimą, o paskui ir nusėdimą ciklone. Ciklonu šios dalelės yra surenkamos ir vėl grąžinamos į pakurą. Toks intensyvus šilumos perdavimas verdančio sluoksnio sistemose su mažu oro pertekliumi sudaro tinkamas sąlygas įvairios kokybės intensyviui biokuro maišymuisi (pvz., su dideliu drėgmės kiekiu) (Lundberg et al. 2017). Tačiau yra apribojimų kalbant apie biokuro dalelių dydį ir kuro priemaišas, kurių gali atsirasti atliekant tam tikrą pirminį kuro apdorojimą. Dėl sudėtingų proceso veiksmų, investiciniai kaštai yra gana dideli, todėl deginimo verdančiame sluoksnyje technologijos nėra tinkamos naudoti mažose katilinėse.

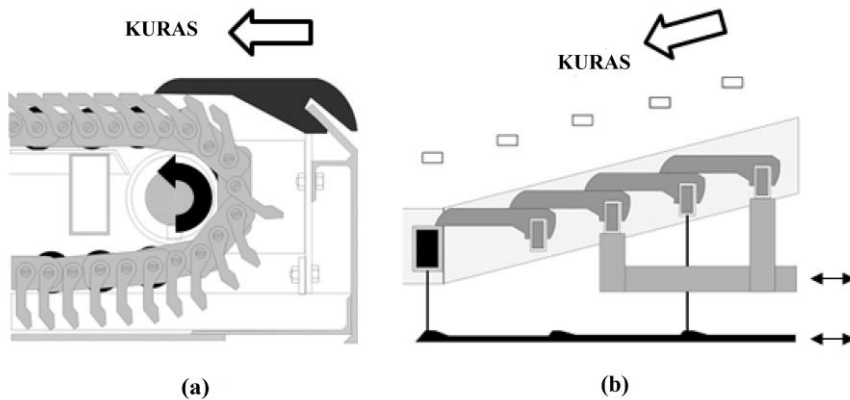
Smulkintos medienos biokuras dažniausiai deginamas biokuro pakurose su judančiu ardynu. Biokuro sluoksnį sudaro netolygiai sukrautų ant ardyno medienos dalelių tūris. Oras degimui paduodamas iš apačios ir keliauja į viršų per sluoksnį kartu su susidarančiais degimo produktais, taip vyksta intensyvūs šilumos masės mainai per kuro sluoksnį. Vienintelis deginimo stacionariame kuro sluoksnyje sistemų trūkumas yra tas, kad degimas sluoksnyje dėl natūralių kuro savybių ir netinkamo maišymosi ant ardyno gali būti labai nevienodas, o tai didina kenksmingų teršalų patekimo į aplinką riziką (van Loo, Koppejan 2012).

Eksploatuojant pakuras su ardynu, deginamas įvairios frakcijos, skirtingos drėgmės (rekomenduojama ne daugiau kaip 55 % drėgmės pagal masę) bei skirtingos prigimtės biokuras (Yin, Rosendahl, Kær 2008a; Razmjoo, Sefidari, Strand 2014). Šiuolaikinės pakuros su ardynu paprastai sudarytos iš keturių pagrindinių sistemų: kuro padavimo, ardyno, degimui reikalingo oro padavimo ir pelenų pašalinimo sistemų (Yin, Rosendahl, Kær 2008). Ardynas gali būti pasviros formos, kad biokuras lengviau keliautų ardynu. Pagrindinė ardynų klasifikacija: judantis, judantis-slankiojantis arba vibruojantis ardynas (Yin et al., 2008).

Sistemose su judančiu ardynu (1.12 a pav.) ardyno ardelės suformuoja juostinį transporterį, kuriuo biokuras keliauja degimo kamera nuo kuro padavimo vietos iki pelenų bunkerio. Ardyno judėjimo greitis turi būti tinkamai sureguliuotas, kad kuras visiškai sudegtų. Vienarūšio kuro, tokio kaip medžio granulės, deginimo sąlygos esant judančiam ardynui yra palyginti tolygios, o tai yra tokio ardyno sistemų privalumas, kadangi kuro sluoksnis ant judančio ardyno nejuda ardyno atžvilgiu. Tačiau netolygus kuro sluoksnio pasiskirstymas ant judančio ardyno, esant skirtingo dydžio kuro dalelėms, dėl sumaišymo stokos yra šio tipo ardyno sistemų trūkumas (Duffy 2012; Sabelström 2007).

Pakurą su slankiojančiu ardynu (1.12 b pav.) sudaro stabilios ir judančios ardelės. Pakurose su slankiojančiu ardynu kuras ardynu perduodamas periodiškai pirmyn ir atgal slankiojančiomis ardelėmis tuo pačiu permaišant nesudegusį ir sudegusį biokurą. Pakura su slankiojančiu ardynu – tinkamas pasirinkimas naudojant įvairaus tipo bei skirtingos granulometrijos biokurą: skiedras, žievę, pjuvenas ar

nuopjovas. Esant nevienodoms kuro rūšims, sistemos su slankiojančiu ardynu dėl geresnio sluoksnio permaišymo ant ardyno yra tinkamesnės nei sistemos su judančiu ardynu.



1.12 pav. (a) Judantis ardynas ir (b) slankiojantis ardynas (Duffy 2012)

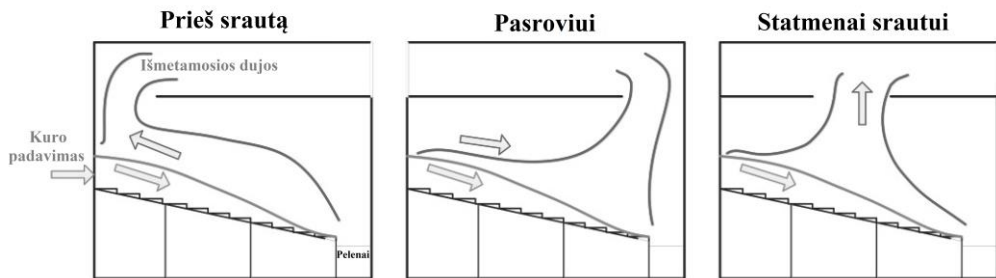
Pakuros su vibruojančiu ardynu turi nuožulnų stacionarų vibruojantį ardyną. Kuras paduodamas jį pilant, o vibravimo tikslas – išlyginti sluoksnį ir pernešti kurą bei pelenus per ardyną (Yin et al., 2008). Vibruojantis ardynas dažniausiai aušinamas vandeniu, todėl išvengiama pelenų sankaupų ir šlakų susidarymo. Be to, yra tinkamas tam tikroms biokuro rūšims, pavyzdžiui, šiaudams. Vibruojančio ardyno sistemų trūkumas yra dėl vibracijos aukštai kylantys pelenai, kurie užteršia katilo vidinius paviršius ir padidina šilumokaičio sienelių perkaitimą ir net degimą (Li et al. 2019).

Pakurose su ardynu biokurą ant fiksuoto arba judančio ardyno paduoda kuro padavimo sistema. Pirminis oras, reikalingas kuro sluoksnio drėgmės išskyrimui bei degimui, tiekiamas per ardyme esančias angas tarp ardymo ardelių arba plyšius tarp jų. Pirminio oro paskirstymas išilgai ardyno gali būti vykdomas siekiant paduoti optimalius kuro ir oro kiekius į įvairias kuro sluoksnio sekcijas (Ahn, Jang 2018). Paduodamo biokuro kiekis, pradinio oro kiekis ir ardymo judėjimo greitis turi būti tinkamai sureguliuoti, kad kuras optimaliai sudegtų. Kuro maišymas, tuo pačiu jo išbuvimo pakuroje trukmė gali būti valdoma reguliuojant ardymo judėjimą (Vorotinskiene et al. 2017).

Degimo produktai, susidarantys virš biokuro sluoksnio, antriniu oru visiškai oksiduojami. Tinkamas degimo dujų ir antrinio oro susimaišymas yra labai svarbus, siekiant visiško kuro sudegimo su mažu oro pertekliaus koeficientu ir kuo didesniu katilo šiluminiu našumu. Biokuro degimo procesas pakurose su ardynu gali būti padalintas į du etapus. Pirmame etape dėl pirminio oro, paduodamo iš apačios, kuro sluoksnis ant ardymo netenka drėgmės bei dujinasi (vyksta dalinis degimas), sudarydamas degiąsias dujas (Rao et al. 2004). Antrame etape viršutinėje pakuros dalyje susidarę degieji produktai sudega, o išmetamieji dūmai atiduoda šilumą į šilumokaičius (Van Kuijk et al. 2008).

1.5.1. Ardyninių pakurų konfigūracijos ir biokuro degimo modeliai

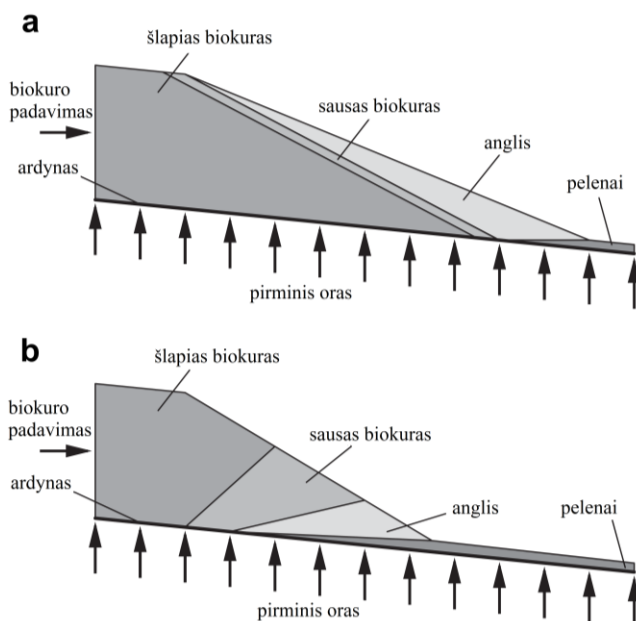
Egzistuoja trys skirtingos ardyninių biokuro deginimo pakurų sistemų konfigūracijos, paremtos kuro dalelių judėjimo ardynu kryptimi ir išmetamųjų dūmų judėjimo krypties atžvilgiu. Priklausomai nuo konfigūracijos, degimo produktai juda prieš srautą, pasroviui ir statmenai srautui (1.13 pav.). Sistemos prieš srautą dažniausiai naudojamos deginant kurą, kuriame yra didelis drėgmės kiekis ir mažas šilumingumas. Karšti išmetamieji dūmai, praslenkantys virš naujo ant ardyno paduodamo kuro sluoksnio, greičiau išdžiovina drėgną kurą. Degimo produktams judant pasroviui su kuru, prailginamas kuro išbuvimo ant ardyno laikas. Ši konfigūracija dažniausiai naudojama deginant iš šiaudų paruoštą biokurą ir iš anksto pakaitinto oro tiekimo sistemose. Pakuros konfigūracija, kai susidarę degimo produktai teka statmenai srautui, apjungia pakurų konfigūracijas prieš srovę ir pasroviui (Troccia 2014).



1.13 pav. Biokuro deginimo pakurų su slankiojančiu ardynu konfigūracijos (van Loo, Koppejan 2012)

Optimizuojant biokuro pakuros veikimo parametrus, kad būtų sumažintos teršalų emisijos, labai svarbu gerai suprasti kuro sluoksnio degimo procesą. Biokuro sluoksnio degimo proceso ant ardyno optimizavimas gali žymiai sumažinti NO_x emisijas (Shah et al. 2018; Razmjoo, Sefidari, Strand 2016). Biokuro degimo metu susidarę dujiniai teršalai yra susiję ne tik su biokuro savybėmis, bet ir su pakuros veikimo parametrais, todėl būtina apžvelgti biokuro degimo modelius, kurie yra tiesiogiai susiję su lakių medžiagų išsiskyrimu, įskaitant NO pirmtakus NH_3 ir HCN . Degimo modelis taip pat daro įtaką kuro sluoksnio degimo stabilumui ir efektyvumui (Yin, Rosendahl, Kær 2008). Du skirtingi biokuro degimo pakurose ant ardyno modeliai pavaizduoti schemomis 1.14 pav.

Remiantis klasikine Rogers (Joseph E.L. Rogers 1973) teorija, dažnai manoma, kad biokuro sluoksnio užsidegimas prasideda sluoksnio paviršiuje dėl spinduliavimo nuo įkaitusių vidinių pakuros paviršių. Vėliau įsidegimas plinta žemyn prieš pirminio oro srautą (1.14 a pav.) tokiu greičiu, kuris priklauso nuo pakuros veikimo sąlygų ir biokuro savybių. Kai įsidegimo frontas pasiekia ardyno paviršių, antrinis biokuro sluoksnio frontas plinta į viršų ir sudegina likusių nuodėgulių sluoksnį. Daug biokuro degimo ant ardyno modeliavimo tyrimų atlikta remiantis būtent tokiu degimo modeliu (Thunman, Leckner 2005; Gort, Brouwers 2001; Johansson, Thunman, Leckner 2007; Yang, Sharifi, Swithenbank 2007).



1.14 pav. Biokuro degimo ant ardyno modeliai: a) sluoksnio degimo plitimas prieš pirminio oro srautą; b) sluoksnio degimo plitimas pagal pirminio oro srautą (Bauer et al., 2010; Razmjoo et al., 2016)

Švedijos mokslininkai Thunmanas ir Leckneris (Thunman, Leckner 2001) savo darbuose ištyrė ir aprašė priešingą biokuro sluoksnio ant ardyno degimo modelį. Pasiūlytas degimo modelis paremtas tuo, kad degimas prasideda biokuro sluoksnio apačioje dėl šilumos laidumo nuo įkaitusių ardelių. Šis sluoksnio degimo modelis stebimas esant dideliame (>60 % pagal masę) drėgmės kiekiui biokure. Tiekiant į pakurą labai drėgną biokurą, žemiau esančiuose biokuro įkrovos sluoksniuose dėl didelio drėgmės kiekio degimo frontui sunku plisti iš sluoksnio viršaus į apačią, todėl yra stebimas degimo fronto plitimas pagal pirminio oro srautą (1.14 b pav.) (Thunman, Leckner 2003). Degant angliai prie ardyno paviršiaus sukaupia šiluma į viršų perduodama konvekcija su karštomis dujomis. Ši šiluma išgarina drėgmę aukščiau esančiame kuro sluoksnyje. Degimo fronto greitis pavaizduotam 1.13 b pav. degimo modeliui yra didesnis nei sluoksnio degimo frontui plintant prieš pirminio oro srautą, kadangi karštų dujų produktai iš įkaitusių anglių oksidavimosi zonos šildo ir kartu džiovina viršutinę kuro sluoksnio dalį (Sabelström 2007). Austrijos mokslininkai Robert Bauer, Markus Golles ir kiti (Bauer et al. 2010), apžvelgę kitų pasaulio mokslininkų atliktų šia tema tyrimų rezultatus, teigia, kad net ir pailginus pakuros (31 MW šiluminės galios) ardyną nuo 2,2 iki 7,5 karto, degimo plitimo fronto greitis 1 degimo modelio atveju (1.14 a pav.) bus per mažas optimaliai sudeginti labai drėgną biokurą. Degimo modelis, kai degimo frontas plinta pirminio oro srauto kryptimi (1.14 b pav.) buvo patvirtintas eksperimentiniais tyrimais (Thunman, Leckner 2001; van Loo, Koppejan 2012; Zadravec et al. 2020) (Bauer et al. 2010) (Kær 2004; Zhou et al. 2021; Garbacz, Wejkowski 2020).

Biokuro degimas ant ardyno, įskaitant įvairių parametrų (ardelių judėjimo cikliškumą, tiekiamos biokuro savybės, pirminio oro srauto greitį bei jo temperatūrą) poveikį biokuro drėgmės išsiskyrimo ir degimo procesams, taip pat išsamiai nagrinėti moksliniuose darbuose (Buchmayr et al., 2015; Caposciutti et al., 2018; Joaquin; Meng et al., 2017b; J. Pérez et al., 2012; Jacobo Porteiro et al., 2010). Pastebėta, kad degimo fronto plitimui įtakos turi ne tik pakuros konfigūracija, pirminio oro parametrai, bet ir tiekiamos į pakurą biokuro drėgmės kiekis. Išanalizavus tarptautinio lygio mokslinę literatūrą, galime daryti išvadą, kad tiekiant į pakurą deginti santykinai sausą, apie 30 % drėgmės pagal masę turintį biokurą, stebimas liepsnos plitimo frontas nuo viršaus į apačią, t. y. priešinga pirminio oro kryptimi (Barroso, Roth, Nussbaumer 2019). O į ardyninę pakurą paduodant drėgną biokurą (>50 % drėgmės pagal masę) ir atsižvelgiant į Ispanijos mokslininkų naujausius atliktus tyrimus, kur modeliavimo rezultatai paremti eksperimentiniais tyrimais (3,9 MW galios biokuro katilinėje), labiausiai tikėtina, kad biokuras ant ardelių degs pirminio oro kryptimi ir didžiausia dalis anglies susidarys prie ardyno paviršiaus (Bermúdez et al. 2020).

1.6. Drėgno biokuro deginimo tyrimai

Pasaulinis susirūpinimas dėl visuotinio atšilimo, vykstančio dėl CO₂ emisijų ir senkančių baigtinių iškastinio kuro išteklių, taip pat ir Europos Sąjungos siekis padidinti atsinaujinančių šaltinių naudojimą šalyse laikantis Jungtinių Tautų nustatytų reikalavimų iki 2030 metų (Zhao et al., 2021), paskatino biomasės ir atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimą energijos gamyboje. Šiandien biomasė užima apie 10 % visos naudojamos pasaulyje energijos kiekio ir šis sektorius vystosi labai greitai dėl mažų energijos pagaminimo kaštų, lyginant su kitais atsinaujinančiais energijos šaltiniais, todėl tikėtina, kad pagaminama energijos dalis ateityje vis didės.

Energijai gaminti deginamas biokuras yra atsinaujinantis pirminės energijos šaltinis dėl nedidelio bendro sistemoje išmetamo anglies dvideginio kiekio. Tačiau šis kuras turi mažą energijos tankį, palyginus su įprastu iškastiniu kuru. Taip pat įtakos turi ir didelis joje esantis drėgmės kiekis, kuris gali siekti 50 % (Liu et al. 2014) ir daugiau. Dažnu atveju energijai gaminti naudojamos medienos atliekos, tokios kaip žievė, pjuvenos, drožlės, miškų kirtimų atliekos, perdirbta mediena ar medienos skiedros (Myllymaa, Holmberg, Hillamo, Laajalehto, Myllymaa, et al. 2015; Huttunen, Holmberg, Stenström 2017). Tad dauguma jų turi didelį drėgmės kiekį pagal masę, kuris priklauso ne tik nuo medienos rūšies, bet ir nuo aplinkos oro sąlygų, metų laiko, vietos ir saugojimo trukmės (Holmberg et al. 2011; Prokkola et al. 2014). Vandens kiekis biokuro masėje gali būti ir kisti nuo 40 % (medienos skiedrose) iki 75 % (žievėje) (Huttunen et al., 2017; Myllymaa et al., 2015; Stenström, 2017). Drėgmė biokure apriboja jo panaudojimą kaip atsinaujinančios energijos šaltinį dėl aukštos transportavimo kainos, laikymo sąlygų ir mažesnio terminio naudingumo energijos virsmų metu. Be to, deginant labai drėgną biokurą, sunaudojamas didelis energijos kiekis drėgmei išgarinti – tai gali padidinti kenksmingų CO dujų emisijas, tai sumažina temperatūrą, dėl to sulėtėja degimo greitis, o kuras sudega neoptimaliai.

Nors biokuro kokybė energetiškai prastesnė nei kitų kuro rūšių, o deginamas biokuras dažnai neatitinka pakuros specifikacijoje numatytų reikalavimų, tačiau

šilumos energijos tiekėjai, siekdami sutaupyti ir išlikti konkurencingi, vis tiek ji renkasi. Biomasės drėgmės kiekis turi būti mažinamas, kad padidėtų energijos tankis ir būtų išvengta nepageidaujamų reiškinių jo sandėliavimo bei deginimo proceso metu. Tam naudojamas drėgmės išskyrimo procesas. Šiaurės šalyse mediena gali būti džiovinama lauke, po jos surinkimo drėgmė gali sumažėti iki 40 %, o sandėliuojant ilgesnį laiką drėgmės kiekis gali sumažėti iki 25 % Tokiomis sąlygomis išvengiama pelėsio plitimo ir kenkėjų. Išdžiūvusios medienos drėgmės kiekis žiemos metu siekia 25 %. Vasaros laikotarpiu drėgmės kiekis dažniausiai nusistovi tarp 15 ir 25 % priklausomai nuo oro sąlygų. Jei mediena per daug drėgna, saugojimo metu ji gali sušilti ir taip atsiranda savaiminio užsidegimo rizika (Prokkola et al. 2014). Savaiminiu džiūvimu galima pasiekti reikiamą drėgmės kiekį biokure, tačiau šis procesas ilgas, tam būtini dideli sandėliavimo plotai. Šilumos gamintojai, nenorėdami įšaldyti investicijų į kuro sandėliavimą, biokurą džiovina atskiruose džiovinimo įrenginiuose (1.4 skyrius). Biokurui džiovinti naudojamų džiovyklų būna įvairių rūšių: stacionarios, degančio sluoksnio, sukamosios ir pneumatinės (Granström, Javeed 2016), tačiau įrengimo ir eksploatavimo kaštai per dideli, kad jų naudojimas būtų ekonomiškai. Džiovinimo sistemos charakteristikos dažniausiai nėra gerai apibrėžtos, todėl sunku kontroliuoti ir numatyti drėgmės išsiskyrimo procesą džiovinimo metu, be to, dalis lakiųjų medžiagų gali būti prarastos, jei mediena džiovinama per ilgai ar per aukštoje temperatūroje (Prokkola et al. 2014). Drėgmės išsiskyrimo procesui reikia didelio energijos kiekio, be to šiam procesui reikia optimalių sąlygų. Kitas, technologiškai paprastesnis ir pigesnis būdas – suintensyvinti drėgmės išsiskyrimo procesą biokuro pakuros džiovinimo zonoje. Yra daug biokuro ardyninių pakurų tipų, tokių kaip: stacionarūs, judantys, grįžtamojo judesio, vibruojantys (Samiei, Peters 2013; Houshang et al. 2016). Visi jie veikia tuo pačiu principu – kuro dalelės tiekiamos iš vienos ardyno pusės ir dega, keliaudamos į kitą ardyno pusę. Dalelių judėjimas stacionariame ardyme vyksta dėl sunkio jėgos. Medienos dalelės, esančios biokuro sluoksnio apačioje, veikiamos džiovinimo oro srautu. Džiovinimo oras degimo kameroje patenka iš apačios ir juda toliau per medžio skiedrų sluoksnį, kur vyksta drėgmės tarp medžiagos ir oro mainai. Kai prasideda drėgmės išsiskyrimo procesas, džiūvimo zona yra biokuro sluoksnio apačioje. Netenka drėgmės zona juda aukštyn, kol drėgmės išsiskyrimo procesas laikomas baigtu (Bengtsson, Claesson 2005). Parametrai, nuo kurių priklauso drėgmės išsiskyrimo procesas, yra šie: džiūvimui tiekiamo oro temperatūra, džiovinimo dujų greitis, biokuro rūšis, dalelių dydis, pradinė drėgmė (Rezaei et al. 2016; Danielsson, Rasmuson 2002; Prokkola et al. 2014). Prieš pradedant smulkintos medienos drėgmės išsiskyrimo bei degimo procesų intensyvumą lemiančių veiksnių tyrimą, būtina apžvelgti kitų mokslininkų atliktus darbus šia tema, kas gali turėti įtakos sudarant tyrimo metodiką.

1.6.1. Biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumą lemiantys veiksniai

Deginant drėgną, prastos kokybės biokurą, sunku palaikyti optimalias degimo sąlygas. Tokio degimo metu didžioji dalis energijos sunaudojama drėgmei garinti, todėl sumažėja temperatūra degimo kameroje, kuras sudega neoptimaliai, išsiskiria daugiau kenksmingų dujų, lieka didelė dalis pelenų. Dėl šių procesų labai drėgno

biokuro potenciali energija nėra iki galo naudingai išnaudojama. Nors dėl limituotų resursų kuro pasiūla nekinta, biokuro paklausa Lietuvoje vis didėja. Šilumos gamintojai, norėdami išlikti konkurencingi, renka pigiausią biržoje siūlomą prastesnės kokybės biokurą. Neretai pristatytas į katilinę biokuras būna tinkamos kokybės bei reikiamos drėgmės, tačiau dėl kritulių drėgmės kiekis jame gali padidėti iki 55 %, o smulkaus biokuro bei su priemaisomis (su žieve, spygliais, lapais) medienos skiedrų biokuro net iki 70 % pagal masę ir daugiau. Jei į pakurą ant ardyno tiekiamas labai drėgnas biokuras (60 ± 5 % drėgmės pagal masę), jo drėgmės išskyrimo procesas užima didžiąją dalį ardyno, dėl to kuras optimaliai nesudega, išgaunamos energijos kiekis sumažėja.

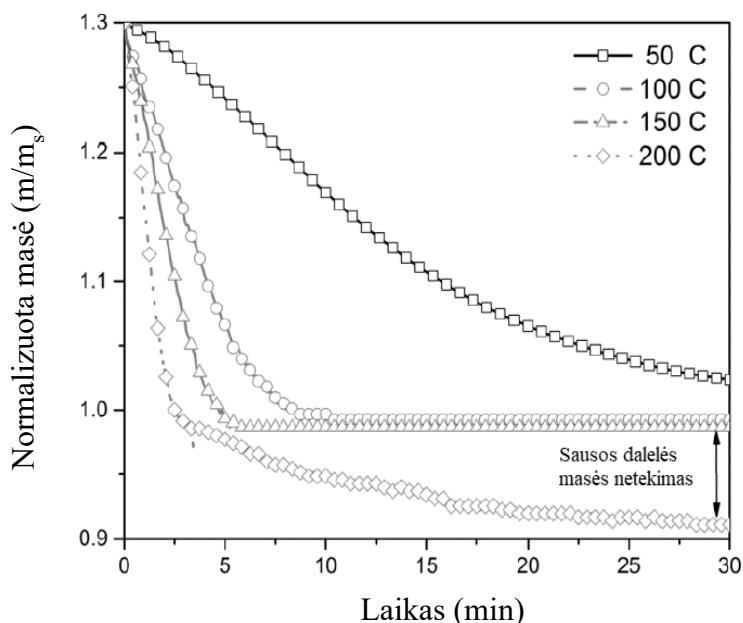
Drėgmės išskyrimas iš biokuro (biokuro džiovinimas) gali būti atliekamas atskiroje džiovykloje ar pakuroje ant ardyno džiovinimo zonoje. Tiek vienu, tiek kitu atveju, drėgmės išskyrimo procesui dažniausiai naudojamas biokuras džiovinamas paduodamu iš apačios oru. Jo parametrai, tokie kaip temperatūra, greitis, turi įtakos biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumui, todėl svarbu parinkti juos tinkamai, kad kure esanti drėgmė būtų kuo intensyviau išgarinama ir kad į aplinką nebūtų išskiriamos kenksmingos bei degios medžiagos. Tai leistų padidinti išgaunamos energijos kiekį iš drėgno biokuro bei optimizuoti degimo procesą pakuroje (Danielsson, Rasmuson 2002; Granström, Javeed 2016). Todėl mokslininkai vykdo eksperimentinius tyrimus, imituodami drėgmės išsiskyrimo procesą, keičiant įvairius tiekiamo oro parametrus, įkrovos aukštį bei pradinį drėgmės kiekį.

1.6.2. Drėgmės išsiskyrimo greičio priklausomybė nuo užsiduotų tyrimo parametrų

Vienas iš svarbiausių parametrų biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumui yra tiekiamo oro temperatūra. Nuo jos priklauso, kaip greitai biokuro dalelės išskiria drėgmę. Svarbu parinkti tinkamą džiovinimo agento temperatūrą, kad biokuras netektų kuo daugiau drėgmės prieš įvykstant degimui. Taip pat svarbu, kad degant biokurui kuo mažiau energijos būtų sunaudojama drėgmei iš kuro dalelių išskirti ir kaip įmanoma didesnė dalis būtų panaudota naudingai energijai (šilumai) pagaminti. Pasirinkus per žemą pirminio oro (džiovinimo agento) temperatūrą, drėgmės išsiskyrimo procesas tampa per lėtas, dėl to kuras sudega neoptimaliai. Jei džiovinimo agento temperatūra bus per aukšta, tikėtina, kad biokuras degs per intensyviai ir kūryklos temperatūra pakils daugiau nei 1000 °C, o tai gali lemti pelenų lydymąsi ir šlakų susidarymą ant vidinių pakuros paviršių. Todėl mokslininkai tyrimus atlieka plačiame temperatūrų diapazone.

H. Rezaei ir J. C. Lau (Rezaei et al. 2016) ištyrė drėgmės išsiskyrimo procesą džiovykloje, tiekiant 50 °C, 100 °C, 150 °C ir 200 °C temperatūros azotą. Eksperimentinio tyrimo metu buvo tirtas smulkintų medienos skiedrų bei smulkintų pušies granulių biokuras. Bandymų metu naudotas džiovinimo įrenginys suprojektuotas ir sumontuotas matuoti bandinių masę nepertraukiamai vykstant tyrimui. Drėgmės išsiskyrimo procesas eksperimente laikytas baigtu, kai netenkama 90 % bandinio drėgmės. Drėgmės išsiskyrimo metu pastebėti trys proceso etapai. Per pirmąjį intensyvėjančio drėgmės išsiskyrimo greičio etapą dalelės pašildomos ir drėgmės išsiskyrimo greitis būna maksimalus, be to, išgarinama apie 30–35 % drėgmės. Per antrąjį trumpojo pastovaus drėgmės išsiskyrimo etapą prarandama

paviršinę drėgmę. Paskutiniame etape drėgmės išsiskyrimo greitis mažėja, prarandama 65–70 % biokuro pradinės drėgmės, kol kuro drėgmė sumažėja iki 0. Rezultatai parodė, kad aukštesnė temperatūra padidina drėgmės išsiskyrimo greitį bei sutrumpina šio proceso laiką. Nustatyta, kad smulkintos medienos biokuro, kurio dalelių dydis 3,2 mm ir drėgmės kiekis 25 %, drėgmės išsiskyrimo laikas sutrumpėja nuo 31 iki 2,5 minutės, kai džiovinimo agento temperatūra padidėja nuo 50 °C iki 200 °C (1.15 pav.). Kartojant eksperimentus su 34 % drėgmės pagal masę smulkintos medienos biokuru, drėgmės išsiskyrimo laikas sutrumpėja nuo 31 iki 3 min.



1.15 pav. Džiovinimo agento temperatūros įtaka smulkintos medienos biokuro drėgmės išsiskyrimui (biokuro dalelių dydis – 3,2 mm; drėgmės kiekis – 25 %) (Rezaei et al. 2016)

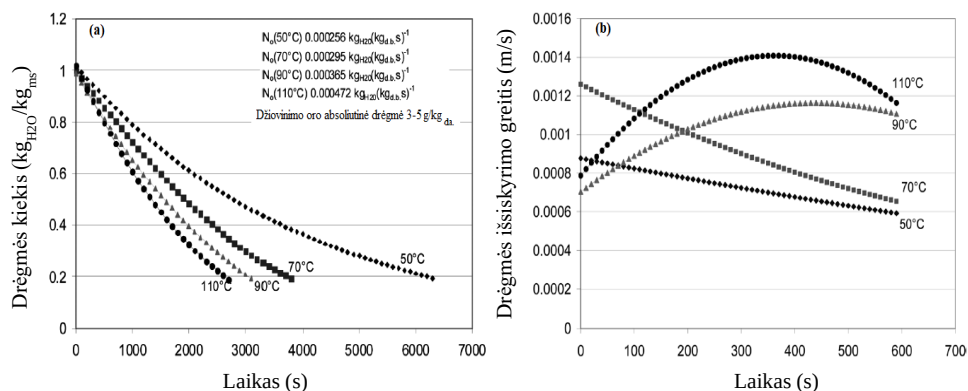
Biokurą veikti 50 °C temperatūros azotu nėra taip naudinga, nes procesas lėtas, temperatūrą padidinus iki 200 °C, drėgmės išsiskyrimas tampa beveik 10 kartų intensyvesnis nei su 50 °C džiovinimo agentu, tačiau kartu su drėgme netenkama ir dalies, apie 3–7 % nuo pradinės sauso bandinio masės, susidariusių degiųjų-lakiųjų medžiagų.

Suomijos mokslininkai tyrė žemesnių temperatūrų (30 °C, 50 °C, 70 °C, 90 °C) džiovinimo agento įtaką biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumui (Myllymaa, Holmberg, Hillamo, Laajalehto, Myllymaa, et al. 2015). Eksperimentas atliktas su smulkintos medienos skiedromis stacionarioje biokuro įkrovoje. Tyrimo metu džiovinimo kamera suprojektuota ir sumontuota ant svarstyklių, kuriomis fiksuojamas bandinių masės praradimas laiko momentu. Biokuro bandiniai – medžių žievės, stiebai ir šakų atliekos, kurių pradinė drėgmė 56 % pagal masę. Medienos skiedrų bandiniai buvo džiovinami iki 17 % drėgmės pagal masę. Temperatūros įtakai, bandinių drėgmės išsiskyrimo intensyvumui įvertinti, tyrimai atlikti su įvairaus

aukščio biokuro įkrovomis: 100 mm, 300 mm ir 500 mm. Iširta, kad džiovinant su 30 °C temperatūros oru, smulkintos medienos biokuro drėgmės išsiskyrimo lėčiausias. 300 mm aukščio medienos skiedrų įkrovos drėgmės išsiskyrimo laikas beveik dvigubai ilgesnis pasirinkus 50 °C nei 70 °C temperatūros orą. Džiovinant su 50 °C temperatūros oru, procesas truko 4 valandas, o su 70 °C temperatūros oru – apie 2,2 valandos. Dar buvo įvertinta ir skiedrų sluoksnio aukščio įtaka drėgmės išsiskyrimo periodui – kai pakuros aukštis padidėja nuo 100 mm iki 300 mm. Džiovinant bandinius su 70 °C temperatūros oru, laikas atitinkamai pakinta nuo 1,3 valandų iki 2,2 valandų, tad arčiausiai oro padavimo paviršiaus esantis bandinio sluoksnis drėgmės netenka intensyviausiai. Iš gautų šio tyrimo rezultatų galima teigti, kad džiovinimo oro temperatūra turėtų būti ne žemesnė nei 70 °C, kad procesas vyktų gana intensyviai.

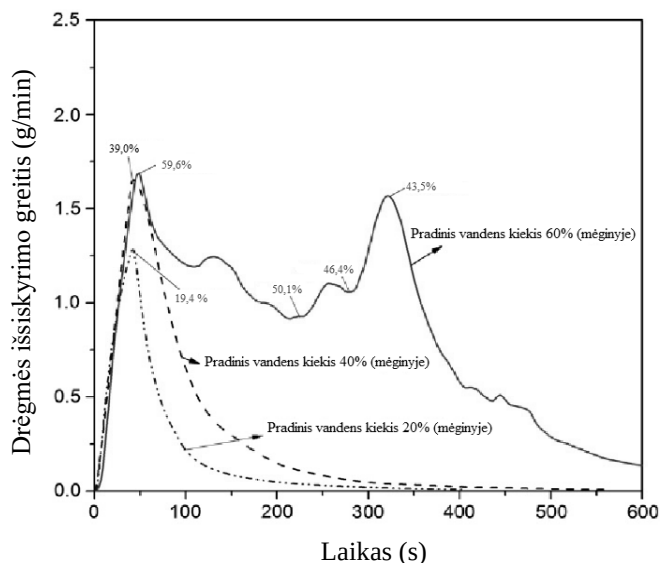
Su 50 °C, 70 °C, 90 °C ir 110 °C temperatūros sausu oru biokuro drėgmės išsiskyrimo tyrimus atliko kiti Suomijos tyrėjai, kurie tyrimams pasirinko 50–60 % drėgmės pagal masę turinčią beržo žievę (Holmberg et al. 2011). Biokuras buvo džiovinamas cilindro formos džiovinimo krosnelėje, kurios diametras – 400 mm, o aukštis – 800 mm. Šio tyrimo metu buvo tirta ne tik džiovinimo oro temperatūros įtaka, bet ir įkrovos aukščio įtaka drėgmės išsiskyrimo proceso intensyvumui. Tirti trys stacionarios biokuro bandinių įkrovos aukščiai: 50 mm, 150 mm ir 250 mm. Bandymo įrenginys integruotas ant svarstyklių, kas suteikė galimybę stebėti masės pokyčius realiu laiku. Džiovinimo oras tiekiamas iš krosnelės viršaus į apačią 0,75 m/s greičiu. Dalis oro srauto pašildoma iki aukštesnės, nei reikia, temperatūros ir sumaišoma su aplinkos oru. Nustatyta, kad, džiovinant 150 mm aukščio beržo žievės biokuro įkrovą 105 minutes su 50 °C temperatūros oru, drėgmės kiekis bandinyje po 45 minučių sumažėja iki 15 % (pagal masę), o džiovinant su 110 °C temperatūros oru – 2,3 karto daugiau (1.16 a pav.). Taip pat pastebėta, kad viso eksperimento metu, net ir tiekiant žemų temperatūrų džiovinimo orą (50 °C), biokuro drėgmės išsiskyrimo greitis nenusistovi. Džiovinant medžio žievę su 50 °C ar 70 °C temperatūros sausu oru, drėgmės išsiskyrimo greitis visą eksperimento laiką mažėja. Gautas rezultatas tyrėjams buvo netikėtas, kadangi įprastai kuo aukštesnė džiovinimo oro temperatūra, tuo drėgmės išsiskyrimo greitis yra didesnis. Tokį rezultatą galėjo lemti tai, kad tuo pačiu metu vyksta vandens garavimas ir kondensacija ant aukščiau esančių šaltų biokuro dalelių, kadangi mažėja ir drėgmės kiekis bandinyje (1.16 b pav.).

Tiriant biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumo procesą esant aukštesnėms džiovinimo oro temperatūroms (90 °C ir 110 °C), pastebėta, kad kondensacijos procesas tampa ne toks reikšmingas ir drėgmės išsiskyrimo greitis eksperimento pradžioje didėja atitinkamai nuo 0,0007–0,0008 m/s iki 0,00115–0,0014 m/s. Tad norint išvengti kondensacijos drėgmės išsiskyrimo procese, džiovinimo oro temperatūra turi būti ne mažesnė kaip 90 °C. Šį teiginį dar kartą patvirtino ir mokslininkų grupė iš Japonijos (Liu et al. 2014), tyrusi 60 %, 40 % ir 20 % drėgmės (pagal masę) medžio pjuvenų džiovinimą. Tyrimai atlikti stacionariame cilindro formos džiovinimo įrenginyje, tiekiant sausą, iš viršaus įkrovos 75 °C, 90 °C ir 105 °C temperatūros orą. Taip pat tirta ir džiovinimo oro srauto, biokuro dalelių dydžio bei įkrovos aukščio įtaka drėgmės išsiskyrimo intensyvumui.



1.16 pav. Džiovinimo oro temperatūros (50 °C, 70 °C, 90 °C ir 110 °C) įtaka a) drėgmės kiekiui, kai įkrovo aukštis 150 mm; b) drėgmės išsiskyrimo greičiui, kai įkrovo aukštis 50 mm (Holmberg et al. 2011)

Rezultatai parodė, kad, norint išvengti kondensacijos proceso ant aukščiau esančių šaltų biokuro dalelių, svarbi net tik džiovinimo oro temperatūra, bet ir džiovinamo biokuro pradinės drėgmės bei įkrovo aukščio ir pločio santykis. Džiovinant labai drėgnas (60 % drėgmės pagal masę) medžio pjuvenas su 90 °C temperatūros oru, taip pat buvo stebimas intensyvus kondensacijos procesas. O džiovinant 40 % ar 20 % drėgmės (pagal masę) bandinius, šis reiškinys išnyksta arba tampa nereikšmingas (1.17 pav.).



1.17 pav. Medžio pjuvenų pradinio drėgmės kiekio įtaka drėgmės išsiskyrimo greičiui. Džiovinimo oro temperatūra 90 °C, oro srautas 0,32 m^3/s . (Liu et al. 2014)

Kaip jau minėta, norint išvengti kondensacijos proceso, kuris stabdo biokuro drėgmės išsiskyrimą, būtina įvertinti ir biokuro įkrovos aukščio ir pločio santykį. Kaip parodė atliktas tyrimas, šis santykis turi būti mažesnis už 1. Tiriant džiovinimo oro greičio įtaką medžio pjuvenų drėgmės išsiskyrimui, nustatyta, kad, padidinus džiovinimo oro greitį 2,5 karto ir džiovinant 100 minučių, drėgmės kiekis bandinyje sumažėja 1,6 karto (nuo 52 % iki 32 % pagal masę). Biokuro dalelių dydžio tyrimas parodė, kad 60 % drėgmės medžio pjuvenų įkrovas (iki 30 g masės) džiovinant su 90 °C temperatūros oru, kurio greitis 0,32 m/s, dalelių dydis (tirtų dalelių dydis: 250–355 ir 355–500 μm) drėgmės išsiskyrimui įtakos neturi ir per 100 minučių abiejų bandinių drėgmės kiekis sumažėja nuo 60 % iki 32 % (pagal masę). Tačiau, 50 % drėgmės (pagal masę) medžio skiedrų bandinius, kurių dydis 3,2, 6,3, 12,7 ir 25,4 mm, džiovinant su sausu iki 100 °C temperatūros oru, drėgmės išsiskyrimo greitis skiriasi 2,5 karto (Rezaei et al. 2016). Džiovinant smulkiausios frakcijos medžio skiedras, drėgmės išsiskyrimo greitis po 20 minučių nuo tyrimo pradžios siekė 0,058 (kg_{H2O}/kg_{ms}), o 25,4 mm daleles, tesiekė 0,023 (kg_{H2O}/kg_{ms}) ir užsiduotą 4 % drėgmę pasiekė po 30 minučių. Džiovinant smulkiausios frakcijos medžių skiedras, visiškas drėgmės išsiskyrimas buvo fiksuotas jau po 15 minučių nuo tyrimo pradžios.

Myllyma ir kiti (Myllymaa, Holmberg, Hillamo, Laajalehto, Ahtila 2015) taip pat tyrė drėgmės išsiskyrimo priklausomybę nuo džiovinimo oro temperatūros, atlikdami biomasės džiovinimo eksperimentus stacionarioje 800 mm aukščio ir 400 mm skersmens džiovykloje. Eksperimentinių tyrimų metu buvo džiovinamos miško kirtimo atliekos (žievė, stiebų mediena, šakos), pristatytos iš Suomijoje eksploatuojamos kogeneracinės jėgainės. Rezultatai atskleidė, kad drėgmės išsiskyrimo proceso trukmė, kai įkrovos sluoksnio aukštis 300 mm, padidinus džiovinimo oro temperatūrą nuo 50 °C iki 70 °C, sutrumpėja perpus, o padidinus temperatūrą nuo 70 °C iki 90 °C, drėgmės išsiskyrimo proceso trukmė kinta nežymiai. Taip pat nustatyta džiovinimo agento srauto įtaka biokuro drėgmės išsiskyrimo greičiui. Džiovinant 300 mm aukščio biokuro įkrovą su 70 °C temperatūros oru ir padidinus oro srautą nuo 0,3 m³/s iki 0,7 m³/s (t. y. 2,3 karto), drėgmės kiekis nuo 58 % iki 17 % (pagal masę) sumažėja 2,3 karto greičiau, nuo 14000 s iki 6000 s. Panašūs tyrimai, esant aukštesnei džiovinimo oro temperatūrai (nuo 60 °C iki 130 °C), buvo atlikti darbe (Prokkola et al. 2014). Eksperimentų metu buvo džiovinama smulkinta pušies, eglės, drebulės ir beržo mediena. Skiedros prieš tiekiant į džiovyklą pašildomos iki kondensacijos taško. 105 °C temperatūros oras tiekiamas pro medžio skiedrų įkrovą iš viršaus žemyn, o susikondensavusi drėgmė surenkama. Susidariusi kondensacijos energija eksperimento metu buvo panaudota iš anksto pašildyti naują drėgną bandinį. Be to, papildoma šiluma iš džiovinimo įrenginio cirkuliuoja tam, kad sušildytų džiovinimo orą, taip drėgmės išsiskyrimo procesui reikia mažiau energijos. Eksperimentinių tyrimų metu pradinė eglės skiedrų drėgmė buvo 56 %, pušies – 51 %. Tyrimų rezultatai parodė, kad medžio skiedros, kur dalelių dydis kinta nuo 32 mm iki 0,3 mm, veikiamos 105 °C temperatūros sausu oru iki 20 % drėgmę (pagal masę) pasieks per 5 valandas, o 0 % drėgmės – per 25 valandas. Papildomai atlikta bandinių terminė analizė, keliant temperatūrą iki 1000 °C. Termogravimetrinės kreivės rodo, kad sparčiausiai drėgmės netenkama tyrimo pradžioje. Pastebėta, kad bandiniai visiškai netenka drėgmės (pasiekia 0 % drėgmės pagal masę) prieš pasiekiant 150 °C

temperatūrą, todėl optimali džiovinimo oro temperatūra yra tarp 100 °C ir 150 °C. Medienos bandiniai gali būti džiovinami ir su žemesne oro temperatūra nei 100 °C, bet ne aukštesne nei 200 °C temperatūra, nes išsiskiriančios tokios lakiosios organinės medžiagos, kaip eteriai, monoterapenai ir kitos (Johansson, Rasmuson 2017; Granström, Javeed 2016), gali būti prarastos drėgmės išsiskyrimo proceso metu. O bandinius veikti su aukštesnės nei 250 °C temperatūros oru nepatartina ir pavojinga, nes bandiniai gali užsidegti.

Apibendrinus visus mokslininkų tyrimų rezultatus, galima daryti išvadą, kad biokuro drėgmės išsiskyrimo proceso intensyvumui svarbu ne tik džiovinimo agento temperatūra ar srautas, bet taip pat reikia įvertinti džiovinamo bandinio dalelių dydį, jų kilmę, pradinę drėgmę bei įkrovos tūrį. Nuo visų šių užsidėtų parametrų priklausys biokuro drėgmės išsiskyrimo greitis bei tam tikrų procesų, vykstančių skirtinguose įkrovos sluoksniuose, tokių kaip dalelių išilimo, garavimo, bei kondensacijos intensyvumas. Siekiant intensyvaus drėgmės išsiskyrimo stacionariame biokuro sluoksnyje, džiovinimo agento temperatūra neturėtų būti žemesnė nei 90 °C, o viršutinė temperatūros riba optimaliam drėgmės išsiskyrimo procesui užtikrinti yra 150 °C. Norint nustatyti dar tikslesnę temperatūrą, reikėtų atlikti tyrimus 90–150 °C tiekiamo oro temperatūrų diapazone, nes džiovinant žemesnėje temperatūroje drėgmės išsiskyrimas neintensyvus, o aukštesnėje (>90 °C) – prarandamos lakiosios medžiagos ar bandinys gali užsidegti.

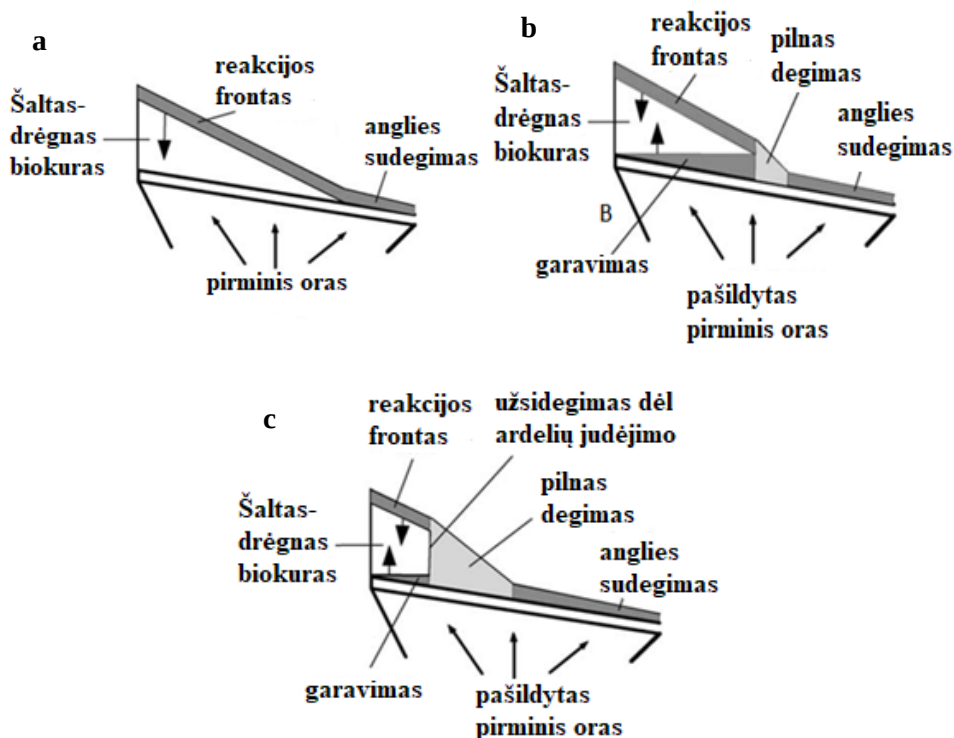
1.6.3. Biokuro drėgmės išsiskyrimo bei degimo intensyvumas pakuros džiovinimo zonoje

Nors biokuro drėgmės išsiskyrimo procesas plačiai analizuojamas įvairiuose moksliniuose darbuose (H. Li et al., 2012; Myllymaa, Holmberg, Hillamo, Laajalehto, & Ahtila, 2015; Pang et al., 2010; Rezaei et al., 2016; Y. B. Yang et al., 2004), tačiau vis dar nėra pakankamai žinių apie drėgno ar labai drėgno kietojo biokuro drėgmės išsiskyrimo proceso intensyvumą pakuros džiovinimo zonoje. Atlikta analizė parodė, kad negalima taikyti vieno modelio visiems pasirinktiems atvejams, kadangi reikia įvertinti net tik biokuro rūšį, drėgmę, tiekiamo džiovinimo agento greitį, temperatūrą, bet ir galimus procesus, atsirandančius drėgmei išsiskiriant skirtinguose biokuro įkrovos sluoksniuose.

Žinoma, kad oro pašildymas veikia kaip katalizatorius ne tik biokuro drėgmės išsiskyrimo procesui, bet ir užsidegimui bei degimo proceso intensyvumui (B. M. van Kessel et al. 2004). 1.18 paveiksle pateiktose schemose vaizduojamos trys skirtingos kuro degimo schemas ant ardyno, esant skirtingoms pirminio oro temperatūroms ir ardyno tipams: degimas su nepašildytu pirminiu oru, degimas su pašildytu pirminiu oru ir nejudančiu ardynu bei degimas su pašildytu pirminiu oru ir judančiu ardynu.

Kaip matyti iš pateiktų schemų, įvedus pašildytą orą galima suintensyvinti į pakurą patenkančio drėgno biokuro drėgmės išsiskyrimo procesą. Dėl pašildyto pirminio oro įtakos suintensyvėja biokuro drėgmės išsiskyrimas, tai lemia greitesnį kuro užsidegimą, visišką jo sudegimą ant ardyno ir mažesnius šilumos nuostolius. Pakuros ardelių judėjimas taip pat padeda drėgmei iš biokuro intensyviau išsiskirti, o

tai priartina reakcijos fronto pradžią bei padidina visiškai sudegusio biokuro plotą (1.17 c pav.).



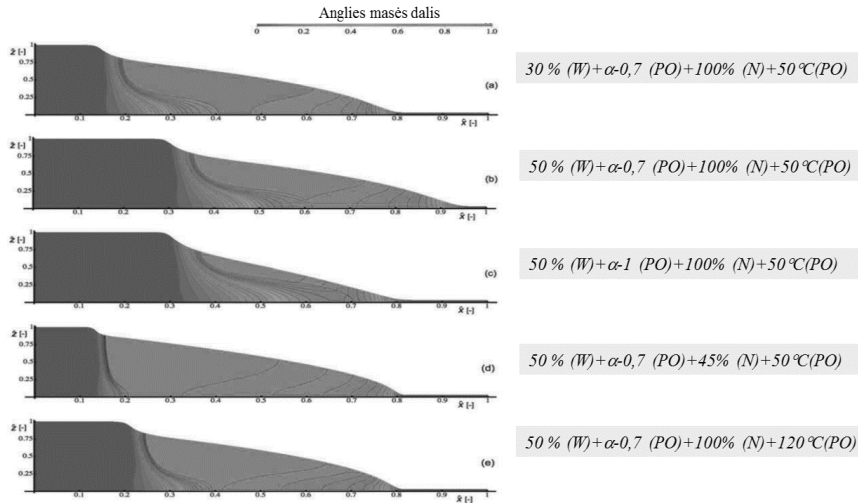
1.18 pav. Skirtingi kuro degimo režimai ant ardyno: a – degimas su nepašildytu pirminiu oru; b – degimas su pašildytu pirminiu oru ir nejudančiu ardynu; c – degimas su pašildytu pirminiu oru ir judamuoju ardynu (B. M. van Kessel et al. 2004).

Degimo proceso metu aukštoje temperatūroje (700–1400 °C) vyksta biokuro egzoterminė oksidacija. Prieš prasidedant degimo procesui vyksta drėgmės išsiskyrimo procesas (degimo procesui kuro drėgmė turi būti mažesnė nei 50 % pagal masę), pereinantis į pirolizės / dujinimo procesą. Deginant biokurą, 90 % energijos panaudojama efektyviai. Susidariusių degimo produktų (dūmų) temperatūra būna artima degimo proceso temperatūrai, todėl dūmai nukreipiami į vandens šildymo katilą šilumai gaminti arba į garo generatorių elektrai gaminti (McKendry, 2002; Ryu et al., 2006; Van Loo et al., 2012)

Biokuro degimas stacionariame sluoksnyje, įskaitant įvairių parametrų (ypač pirminio oro srauto) poveikį degimo procesui, buvo išsamiai tirtas darbuose (J. Collazo et al., 2012; Guo et al., 2014; Meng et al., 2017, 2018, 2021; J. F. Pérez et al., 2012; J. Porteiro et al., 2010; Saastamoinen et al., 2000; Wiinikka et al., 2007). Iš paminėtų parametrų ypatingą vaidmenį degimui pakuroje ant nejudančio ardyno turi deginamo biokuro drėgmės kiekis. Yang ir kiti (Yang, Sharifi, Swithenbank 2004) atliko skaitinius bei eksperimentinius tyrimus, siekdami nustatyti, kokį poveikį drėgmės kiekis turi smulkintos medienos biokuro bei komunalinių atliekų deginimo charakteristikoms nejudančiame sluoksnyje. Liang ir kt. (Liang et al. 2008) išmatavo

komunalinių atliekų užsidegimo greitį, sluko snio svorį, temperatūrą ir dujų pasiskirstymą stacionariame sluoksnyje, kai kuro drėgmės kiekis kinta.

Jorge Martinez-Garcia ir Thomas Nussbaumer (Martinez-Garcia et al., 2015) atliko medienos skiedrų deginimo ant judamojo ardyno modeliavimo tyrimus (1.19 pav.).



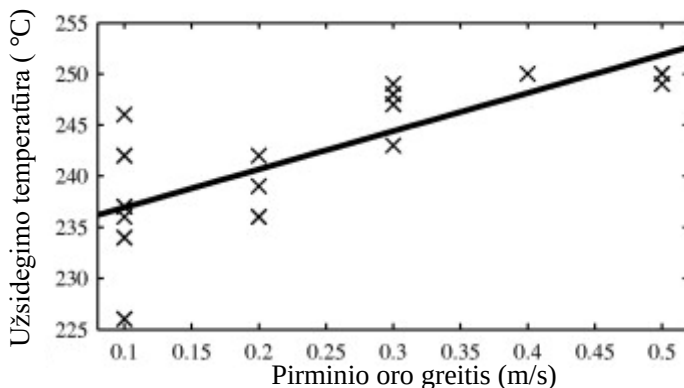
1.19 pav. Liepsnos plitimo frontas biokuro sluoksnyje kintant kuro drėgmei, paduodamo pirminio oro kiekiui ir temperatūrai (Martinez-Garcia et al., 2015)

Medienos skiedrų dalelės, kurių charakteringas ilgis yra 12 mm, buvo deginamos 1,2 MW galios šilumos gamybos įrenginyje. Pirminio oro pertekliaus koeficientas 0,7, temperatūra 50 °C. Taip pat darbe vertinama ir vidinių pakuros sienų temperatūra 1010 °C bei ardelių judėjimo greitis 0,009 m/s. Parametrai taikomi matematiniame modelyje buvo parinkti remiantis eksperimentinių tyrimų duomenimis (Kiener, Nussbaumer 2012).

Kiener and Nussbaumer savo darbe nustatė biokuro ant ardyno optimalų medienos dalelių konversijos dydį, kuris išreikštas per ardyno ilgį: $x = 0,8 L$. Ištirta, kad esant pasirinktiems katilo darbiniais parametrams, biokuras ant grotelių iki neorganinės dalies sudega pasiekęs 0,8 ardyno ilgio. Jorge Martinez-Garcia ir Thomas Nussbaumer (Martinez-Garcia et al., 2015), remdamiesi šiais eksperimentais ir sudarytu modeliu, nustatė pagrindinių parametru: pirminio oro pertekliaus koeficiento bei biokuro drėgmės įtaką liepsnos plitimui (1.19 pav.). Nustatyta, kad tiekiant į pakurą ant ardyno 30 % drėgmės (pagal masę) biokurą, liepsnos plitimas prasideda 0,15 ardyno ilgio atstumu, o tiekiant 50 % bei esant tam pačiam pirminio oro pertekliaus koeficientui ir pirminio oro temperatūrą palaikant 50 °C, liepsnos plitimas prasideda 0,3 ardyno ilgio. Šiame darbe taip pat ištirta, kad pro ardyno apačią tiekiant 120 °C temperatūros pirminį orą degimo procesas galėtų prasidėti apie 0,15 ardyno ilgio, o padidinus pirminio oro pertekliaus koeficientą nuo 0,7 iki 1, liepsnos fronto pradžia nepasikeičia (apie 0,31 ardyno ilgio), tačiau kuras sudega greičiau.

Blijderveen ir kt. (Blijderveen et al., 2010; van Blijderveen et al., 2013) bei Markovic ir kt. (Markovic, Bramer, Brem 2014) taip pat tyrinėjo pirminio oro

temperatūros ir srauto įtaką biokuro degimo charakteristikai ir pademonstravo spontaniško užsidegimo fronto ties ardynu susidarymą stacionarioje pakuroje (1.20 pav.).



1.20 pav. Biokuro užsidegimo temperatūra kintant pirminio oro greičiui (Blijderveen et al. 2010)

Šiems tyrimams atlikti buvo pasirinktas biokuras, kuris dažniausiai deginamas biokuro katilinėse, t. y. tirtos smulkintos miško kirtimo atliekos. Spontaniško užsidegimo tyrimai atlikti stacionarios įkrovos 1350 mm aukščio ir 150 mm skersmens pakuroje. Pavaizduota paveiksle biokuro užsidegimo temperatūra atitinka pirminio oro temperatūrą. Iš pateiktų rezultatų matyti, kad, esant pirminio oro greičiui 0,1 m/s, biokuro užsidegimo temperatūra gali kisti nuo 225 °C iki 245 °C. Tačiau didėjant pirminio oro greičiui, užsidegimo temperatūros diapazonas mažėja ir, esant greičiui 0,4 m/s, tikėtina, kad užsidegimas prasidės po 150 minučių esant 250 °C. Siekiant ištirti biokuro drėgmės poveikį savaiminiam užsidegimui, bandiniai buvo drėkinami. Atlikti eksperimentai su 9–12,7 %, 18–20 %, 30 % ir 50 % drėgmės pagal masę medienos skiedromis. Medienos skiedrų, kurių drėgmė pagal masę siekė 50 %, vykdant eksperimentus 150 min, uždegti nepavyko, kadangi skiedroms džiovinti reikia daugiau energijos, tai stabdo devolatilizaciją ir slopina egzotermines reakcijas, vykstančias medienoje. Vis dėlto, jei biokuro sluoksnis būtų veikiamas tokiomis sąlygomis (temperatūra ir oro srauto greitis) ilgiau, jis iš dalies prarastų drėgmę ir užsidegtų. Apskritai, esant tokiam drėgmės kiekiui bandinyje, buvo atlikti tik keli eksperimentiniai bandymai, todėl patikimo santykio tarp kuro drėgmės kiekio ir užsidegimo temperatūros neįmanoma gauti. Tačiau galima tikėtis, kad savaiminio užsiliepsnojimo ir kritinės oro temperatūros pokyčių nebus kintant drėgmės kiekiui, keisis tik užsidegimo laikas. Tai pat verta paminėti, kad apžvelgtoje literatūroje Švedijos mokslininkai Thunman ir Leckner (Thunman, Leckner 2005), viename iš savo darbų tyrinėdami medienos skiedrų bandinių užsidegimą ant ardyno, eksperimentiniais tyrimais pagrindė, kad biokuro savaiminis deginimo frontas gali prasidėti tik, kai biokuro drėgmė pagal masę tampa mažesnė nei 45 %.

Matematinis prognozavimo modeliavimas gali būti naudojamas kaip alternatyva siekiant saugiai ir efektyviai sureguliuoti ardyninių pakurų darbinis parametrus (paduodamo kuro, oro kiekį, ardyno judėjimo dėsni) drėgnam biokurui deginti.

Kadangi naudojamos kūryklų valdymo strategijos yra pasenusios, lyginant su šiuolaikinėmis valdymo teorinėmis galimybėmis, todėl yra kuriami nauji ir tobulinami seni matematiniai modeliai, padėsiantys perprasti ir sukontroliuoti degimo procesą pakurose (Thunman, H., Leckner 2001). Norint įsitikinti matematinio modelio teisingumu, būtina atlikti eksperimentinius bandymus esant toms pačioms sąlygoms ir matematiname modelyje pasirinktiems tiems patiems pakuros darbiniams parametrams. R. Bauer iš Austrijos atliko drėgno biokuro deginimo bandymus 180 kW šiluminės galios biomasės deginimo įrenginyje su ardynine pakura (Bauer et al. 2010). Atlikti tyrimai ir skaičiavimai pagal priimtą matematinį modelį su medienos skiedrų mišiniais, kurių drėgmė pagal masę buvo 0 %, 21 % ir 61 %, parodė, kad biokuro drėgmės kiekiui kūrykloje padidėjus nuo 21 % iki 61 % pagal masę, drėgmės išsiskyrimo greitis padidėja nuo 10 kg/h iki 40 kg/h, o padidinus paduodamo oro srautą į kūryklą nuo 169 iki 250 kg/h, drėgmės išsiskyrimo greitis keičiasi nežymiai, tačiau žymiai keičiasi biokuro terminis skaidymo greitis – nuo 35 kg/h iki 45 kg/h. Tai pat šių tyrimų rezultatų autoriai pagrindžia, kad drėgnas biokuras pakuroje su ardynu dega iš apačios į viršų.

Detalios eksperimentinius ir matematinio modeliavimo biokuro sluoksnio degimo tyrimus atliko mokslininkai iš Liuksemburgo ir Vokietijos (Mahmoudi et al. 2016). Eksperimentiniai tyrimai, atlikti stacionaraus sluoksnio deginimo įrenginyje, kur pirminis oras paduodama iš ardyno apačios, palyginti su modeliavimu gautais rezultatais. Nors skaitiniai tyrimai atlikti deginant medžio skiedras ant judamo ardyno, kur pirminis oras taip pat paduodamas iš apačios, rezultatai labai gerai koreliuoja su eksperimentinių tyrimų metu gautais rezultatais. Šie tyrimai yra labai naudingi siekiant praktiniu požiūriu sustiprinti suvokimą apie drėgno nestacionaraus biokuro sluoksnio deginimą pakurose (Markovic, Bramer, Brem 2014; Martinez-garcia et al. 2015; Myllymaa, Holmberg, Hillamo, Laajalehto, Ahtila 2015).

1.7. Darbo uždavinių formulavimas ir autoriaus indėlis į nagrinėjamą problematiką

Literatūros apžvalgoje išnagrinėtas dažniausiai naudojamos smulkintos medienos biokuro degimo ypatumai. Apžvelgta katilinėse deginamos medienos struktūra, savybės, drėgmės kiekio įtaka, jos matavimo metodai, biokuro drėgmės išsiskyrimo proceso principai bei drėgmės išsiskyrimo ir deginimo technologijos. Daugiausiai dėmesio skirta biokuro drėgmės išsiskyrimui turinčių įtakos veiksnių ir biokuro drėgmės išsiskyrimo bei degimo intensyvumo pakuros džiovinimo zonoje tyrimams. Šį pasirinkimą lėmė tai, kad deginimo procesui naudojant labai drėgną (>60% pagal masę) smulkintos medienos biokurą, susiduriama su neoptimaliu kuro sudegimu bei kenksmingų teršalų išmetimu į aplinką.

Atlikus literatūros apžvalgą, matyti, kad atlikta daug ir išsamių tyrimų biomasės džiovinimo ir deginimo tema, tačiau tam tikrų duomenų, tokių kaip biokuro džiovinimas mažose džiovinimo agento greičio zonose (iki 0,1 m/s) vis dar trūksta. Taip pat vis dar nėra žinoma ar literatūroje nėra aptinkama informacijos apie įvairių savybių smulkintos medienos (su žieve, lapais ir spygliais) biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumą, priklausomai nuo pagrindinių degimui įtakos turinčių veiksnių: pirminio oro, recirkuliacijos dūmų, spinduliavimo nuo įkaitusių pakuros

paviršių bei ardymo judėjimo greičio. Skirtingų savybių iš miško kirtimo atliekų pagamintas smulkintos medienos biokuras leis įvertinti sudėties ir struktūros įtaką drėgmės išsiskyrimo intensyvumui ant ardymo, pakuros džiovinimo zonoje. Remiantis mokslinė literatūra, nutarta atlikti trijų tipų eksperimentinius tyrimus:

- Skirtingų savybių smulkintos medienos biokuro drėgmės išsiskyrimo, naudojant skirtingos 50–200 °C temperatūros orą ar oro ir vandens garų mišinį, eksperimentiniame stacionaraus biokuro sluoksnio džiovinimo stende, imituojant pirminio oro, recirkuliacijos dūmų bei spinduliavimo nuo vidinių pakuros paviršių įtaką, tyrimą.
- Smulkintos medienos drėgmės išsiskyrimo priklausomumo nuo sluoksnio maišymo intensyvumo tyrimą.
- Virtualaus jutiklio panaudojimo tinkamumo netiesioginiam biokuro drėgmės matavimui realioje pakuroje tyrimą.

Kadangi drėgno biokuro deginimas sukelia įvairių degimo proceso optimizavimo ir kenksmingų teršalų išmetimo į aplinką problemų, todėl atlikus skirtingų savybių biokuro drėgmės išsiskyrimo tyrimus, pagal gautus rezultatus suformuluotos ir pateiktos išvados bei rekomendacijos biokuro drėgmės kiekio išsiskyrimo intensyvumui didinti, atsižvelgiant į biokuro drėgmės išsiskyrimo procesui įtakos turinčius veiksniai.

Disertacijos autorė atliko mokslinės informacijos apie biokuro drėgmės išsiskyrimo metu vykstančius procesus ir jų intensyvinimo galimybių analizę imituojant pakuros darbinis parametrus. Buvo suprojektuotas bei sukonstruotas biokuro džiovinimo tyrimų stendas, kuriame atlikti biokuro drėgmės išsiskyrimo tyrimai, imituojant 6 MW galios pakuroje drėgmės išsiskyrimui turinčių veiksnių įtaką. Siekdama nustatyti biokuro drėgmės išsiskyrimo ypatumus bei paaiškinti vykstančius procesus ir jų priežastis, autorė atliko biokuro įkrovoje temperatūrų kitimo analizę. Atsižvelgdama į gautus biokuro drėgmės išsiskyrimo rezultatus, disertacijos autorė pateikė išvadas bei rekomendacijas biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumui didinti, atsižvelgiant į biokuro drėgmės išsiskyrimo procesui įtaką turinčius veiksniai.

2. TYRIMŲ METODIKA

2.1. Smulkintos medienos bandinių fizikinės ir cheminės savybės

Atsižvelgiant į tai, kad dažniausiai katilinėse naudojamas įvairus atliekinės kilmės biokuras (miškų kirtimo atliekos, miestų tvarkymo atliekos ir lentpjūvių atliekos), kurio dalelių dydis bei drėgnumas gali ženkliai skirtis, eksperimentiniams biokuro drėgmės išsiskyrimo tyrimams buvo pasirinkti skirtingos granulimetrinės sudėties biokuro bandiniai (2.1 pav.): Nr. 1 – smulkinta mediena su žieve (miškų kirtimų atliekos), Nr. 2 – smulkinta mediena su lapais (miestų želdynų ir parkų tvarkymo atliekos) ir Nr. 3 – smulkinta mediena su spygliais (miškų tvarkymo atliekos). Bandinių nuotraukos pateiktos 2.1 paveiksle. Prieš atliekant eksperimentinius tyrimus, buvo nustatytos bandinių charakteristikos.



2.1 pav. Smulkintos medienos bandiniai, naudoti eksperimentiniams tyrimams

2.1.1. Bandinių komponentinė ir elementinė sudėtis

Yra žinoma, kad charakteringi biokuro parametrai lemia tiek drėgmės išsiskyrimą, tiek ir degimo procesus, todėl, vadovaujantis Lietuvos standartais, reglamentuojančiais atitinkamus bandinių analizės metodus, buvo atlikta smulkintos medienos bandinių analizė: drėgmės kiekio bandiniuose matavimas atliktas remiantis standartu LST EN ISO 18134-1, peleningumo – standartu LST EN 14775, šilumingumo – standartu LST EN 14918. Elementinė mėginių sudėtis (anglies, vandenilio, azoto, sieros elementų kiekiai) nustatyta vadovaujantis standartu LST EN 15104, naudojant analizatorių *Thermo Scientific Flash 2000 CHNS/O*: 2–3 mg susmulkinto bandinio per kelias sekundes sudeginama 1800 °C temperatūroje. Išsiskyrusios dujos helio srautu nunešamos į chromatografinę kolonėlę, kur susidarę oksidai išskiriami ir nustatomi šiluminio laidumo detektoriumi. Papildomai naudota įranga: elektroninės svarstyklės ABT 220-5DM, džiovinimo krosnelė 2V-151, aukštatemperatūrė krosnelė SNOL 1,6.2,5.1/9IZ, kalorimetras IKA C5000. Nustatytos bandinių charakteristikos pateiktos 2.1 lentelėje.

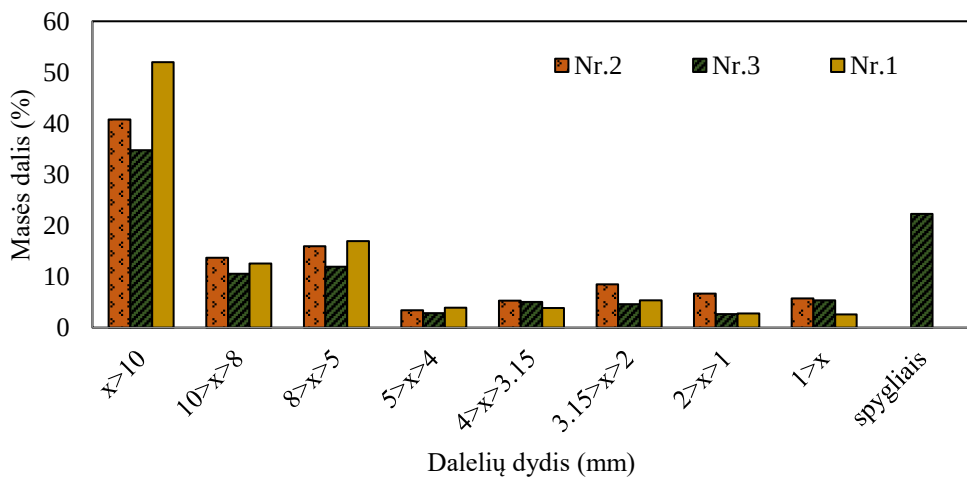
Atlikus bandinių komponentinės ir elementinės sudėties analizę, nustatyta, kad tiriamas smulkintos medienos biokuras pagal elementinę sudėtį yra panašus, tačiau skirtingas drėgmės ir pelenų kiekis. Visgi pagrindinė biokuro charakteristika, kuri

daugiausiai galėtų lemti drėgmės išsiskyrimo intensyvumą visoje įkrovoje, yra dalelių dydis (Rezaei et al. 2016).

2.1 lentelė. Smulkintos medienos bandinių charakteristikos

Parametras	Smulkinta mediena su žieve	Smulkinta mediena su lapais	Smulkinta mediena su spygliais
<i>Komponentinė sudėtis</i>			
Drėgmės kiekis, %	36,1	33,0	14,1
Šilumingumas (aukštutinis), kJ/kg	18998	18630	19785
Peleningumas, %	3,5	4,5	7,6
<i>Elementinė sudėtis (masės %, sausos)</i>			
Anglis	48,60	49,13	448,53
Vandenilis	5,80	5,97	5,39
Degūnis	41,49	39,87	38,47
Azotas	0,60	0,52	0,79
Siera	<0,01	<0,01	<0,01

Siekiant įvertinti dalelių dydžio įtaką drėgmės išsiskyrimo procesui, eksperimentiškai buvo nustatyta sausų smulkintos medienos bandinių frakcinė sudėtis (dalelių pasiskirstymas pagal dydį), naudojant aštuonis skirtingo tankumo sietus. Gauti duomenys pateikti grafiškai 2.2 paveiksle.



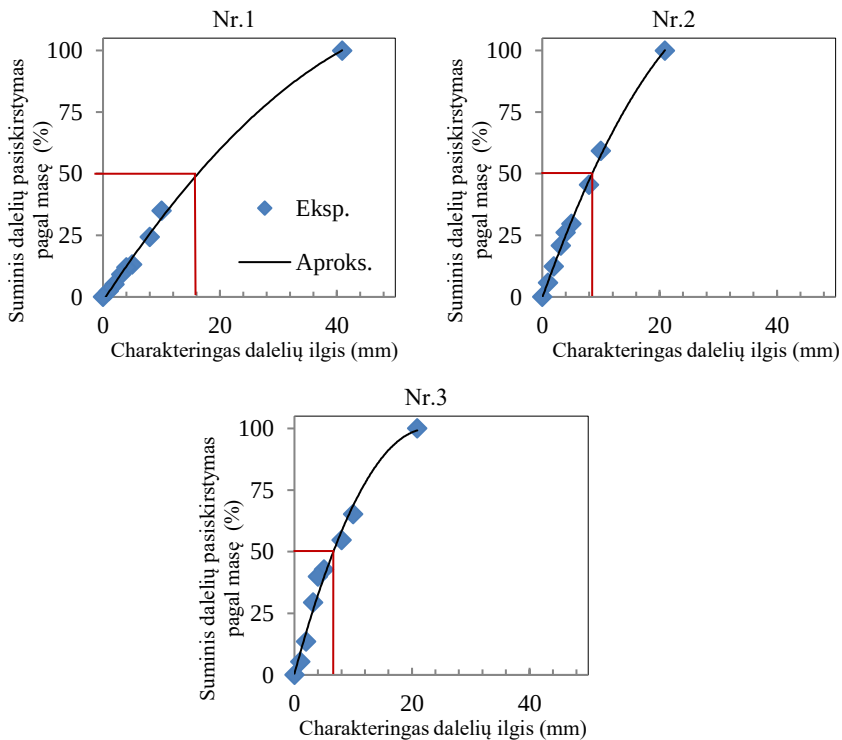
2.2 pav. Smulkintos medienos bandinių dalelių dydžio pasiskirstymas pagal masę %

Gauti rezultatai parodė, kad didžioji dalis (30–53 %) eksperimentiniuose tyrimuose naudotų smulkintos medienos bandinių dalelių buvo didesnės nei 10 mm, o smulkiausios frakcijos buvo miško kirtimų atliekos, kur dominavo spygliai.

2.1.2. Bandinių dalelių charakteringo skersmens tyrimas

Vienas iš pagrindinių biokuro kokybės parametrų yra dalelių pasiskirstymas pagal dydį, kuris taip pat daro įtaką drėgmės išsiskyrimo bei išsiskyrimo procesui (Rezaei et al. 2016). Norint pateikti gautų drėgmės išsiskyrimo eksperimentinių tyrimų apibendrinančias išvadas, svarbu nustatyti vidutinį dalelės dydį bandinyje. Todėl prieš pasirinktos smulkintos medienos drėgmės išsiskyrimo eksperimentinį bandymą bandiniai buvo sijojami, siekiant nustatyti sauso biokuro bandinių dalelių dydžio pasiskirstymą ir vidutinės dalelės dydį. Bandiniai buvo sijojami per aštuonis sietus, kurių sieto akių dydis buvo nuo 1 iki 10 mm.

2.3 pav. pateikti bandymų metu nustatyti smulkintos medienos su žieve, lapais ar spygliais dalelių dydžių skirstiniai. Gautuose dalelių dydžių skirstiniuose, pagal (Hartmann, Bo, Daugbjerg 2006) pateiktą metodiką, nustatytas vidutinis dalelės ilgis. Smulkintos medienos su žieve charakteringas ilgis 16,2 mm, smulkintos medienos su lapais – 8,5 mm, o smulkintos medienos su spygliais – 6,6 mm.



2.3 pav. Smulkintos medienos bandinių su žieve (Nr. 1), su lapais (Nr. 2) ir su spygliais (Nr. 3) charakteringas dalelių ilgis pagal masę

2.1.3. Smulkintos medienos bandinių paruošimas

Imituojant, kad biokuras gali patekti į pakurą labai drėgnas (60 ± 5 % pagal masę), laboratorijoje tiriami smulkintos medienos bandiniai buvo papildomai mirkomi vandenyje, kad pasiektų apie 60 % drėgmės kiekį pagal masę. Bandymai atlikti taip: biokuras kraunamas į plieninį sieta, kuris įleidžiamas į specialią talpyklą su vandeniu ir paliekamas mirkti 16 valandų. Sietas su įmirkytu smulkintos medienos

biokuru ištraukiamas ir paliekamas natūraliai džiuoti 2 valandas pastovios temperatūros patalpoje (Bauer et al. 2010) (Markovic, Bramer, Brem 2014). Smulkintos medienos bandiniai buvo mirkomi vandenyje 8, 16, 24 ir 48 valandas, tada paliekami natūraliai džiuoti 2 valandas. Prieš mirkymą vandenyje ir po jo bandinyje esantis drėgmės kiekis nustatytas atsižvelgiant į standarto LST EN ISO 18134-1 reikalavimus, t. y. 24 valandas džiovinant bandinį 105 °C temperatūroje. Drėgmės kiekis bandinyje apskaičiuojamas pagal formulę (1).

$$W = \frac{m_p - m_s}{m_p} * 100; \quad (1)$$

čia W – apskaičiuotas smulkintos medienos bandinio drėgmės kiekis (%) pagal paradinę bandinio masę; m_p – pradinė bandinio masė prieš džiovinimą (g); m_s – sauso bandinio masė (g).

Gauti duomenys pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Smulkintos medienos bandinių drėgmė prieš ir po mirkymo vandenyje

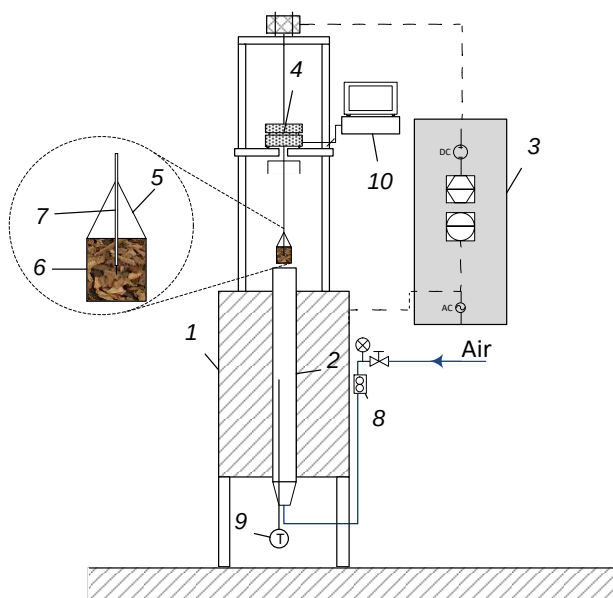
Nr.	Bandinys	Pradinė bandinio drėgmė, % (pagal masę)	Drėgmė po 8 h mirkymo ir 2 h sausinimo, % (pagal masę)	Drėgmė po 16 h mirkymo ir 2 h sausinimo, % (pagal masę)	Drėgmė po 24 h mirkymo ir 2 h sausinimo, % (pagal masę)	Drėgmė po 48 h mirkymo ir 2 h sausinimo, % (pagal masę)
1	Smulkinta mediena su žieve Nr. 1	36,1	56,3	59,5	60,3	61,1
2	Smulkinta mediena su lapais Nr. 2	33,0	58,9	60,2	62,2	61,3
3	Smulkinta mediena su spygliais Nr. 3	14,1	60,7	63,1	64,3	65,5

2.2. Tyrimų standai

2.2.1. Tyrimų stendas drėgmės išsiskyrimui iš smulkintos medienos bandinių tirti

Siekiant įvertinti, ar skiriasi ir kaip skiriasi šviežiai nukirsto medžio skiedrų ir natūraliai džiovintos bei vandeniui įmirkytos smulkintos medienos bandinių drėgmės išsiskyrimo pobūdis, buvo atlikti eksperimentiniai bandymai, kurių metodika aptarta

toliau. Šiam tikslui pasiekti pakoreguotas ir pritaikytas LEI Degimo procesų laboratorijoje suprojektuotas ir eksploatuotas smulkintos medienos bandinių masės pokyčio tyrimų stendas (PAULAUSKAS 2017) (2.4 pav.). Smulkintos medienos masės drėgmės išsiskyrimui tirti buvo naudota elektrinė krosnelė (1). Ant krosnelės paviršiaus pritvirtintas specialus rėmas su judančiu padėklu, ant kurio sumontuotos elektrinės svarstyklės Kern EW 420-3NM (4), kurių matavimo tikslumas yra $\pm 0,003$ g. Tyrimui panaudota svarstyklių programinė įranga Kern BC2006. Matavimų duomenims surinkti svarstyklės buvo pajungtos prie kompiuterio (10). Svarstyklių apačioje, prie įmontuoto svėrimo taško, pakabintas tuščiaviduris strypas su plieninės vielos krepšeliu (5). Krepšelyje sumontuota K-tipo termopora (7) bandinio centro temperatūrai matuoti, o termoporos jungtys išvestos per tuščiavidurio strypo viduje esantį izoliacinį keraminį vamzdelį. Termoporos jungtys prijungtos prie duomenų surinkimo įrangos PICO TC-08. Elektros variklio ir plieninio tros sistema (padėklas, svarstyklės, strypas su laikikliu) pritaikyta bandinio įleidimui ir iškėlimui iš krosnelės vidaus. Pasiekus krosnelėje užduotą temperatūrą, pradedamas tiekti $10 \text{ m}^3/\text{h}$ arba 167 l/min oro srautas. Oro srautas tiekiamas iš krosnelės apačios per vamzdžio gale sumontuotą angą. Laukiant, kol krosnelės viduje nusistovės 150°C temperatūra, į plieninį vielos krepšelį sudedamas paruoštas bandinys. Bandinio masei nusistovėjus, krepšelis su bandiniu per atvirą viršutinį vamzdžio galą įleidžiamas į krosnelę. Pasibaigus drėgmės išsiskyrimo procesui, t. y. nusistovėjus bandinio masei bei bandinio centro temperatūrai, krepšelis su bandiniu iškeliamas.



2.4 pav. Biokuro masės pokyčio tyrimų stendo schema: 1 – elektrinė krosnelė; 2 – keraminis vamzdis; 3 – valdymo blokas; 4 – elektrinės svarstyklės; 5 – bandinio krepšelis su įmontuota termopora; 6 – biokuro bandinys; 7 – bandinio krepšelio laikiklis; 8 – rotametas oro srautui nustatyti; 9 – termopora oro srauto temperatūrai matuoti; 10 – kompiuteris duomenims rinkti ir saugoti

Bandinio drėgmės kiekio pokytis pasirinktu laiko momentu apskaičiuojamas pagal (2) formulę:

$$W = \frac{W_i}{W_p} 100; \quad (2)$$

čia W – apskaičiuotas drėgmės kiekis bandinyje (%), kur W_p – pradinis drėgmės kiekis bandinyje (g) ($W_p = W_1$); W_i – drėgmės kiekis bandinyje (g), kur drėgmės kiekio vertės $W_1, W_2, W_3 \dots$. W_i laiko momentu $t_1, t_2, t_3 \dots$. t_i ir apskaičiuojamas pagal (3) formulę:

$$W_i = m_i - m_s; \quad (3)$$

kur m_i – bandinio masė (g) laiko momentu t_i , kur bandinio masės vertės $m_1, m_2, \dots$, m_i , o m_s – sauso bandinio masė (g).

Bandinių drėgmės išsiskyrimo greitis r_{BH} (g/s) apskaičiuotas pagal (4) formulę:

$$r_{BH} = \frac{m_i - m_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}; \quad (4)$$

ir išreiškiamas (formulė (5)) procentais pagal maksimalią vertę:

$$r_{BH} = \frac{r_{BH}}{r_{BH_{max}}} 100; \quad (5)$$

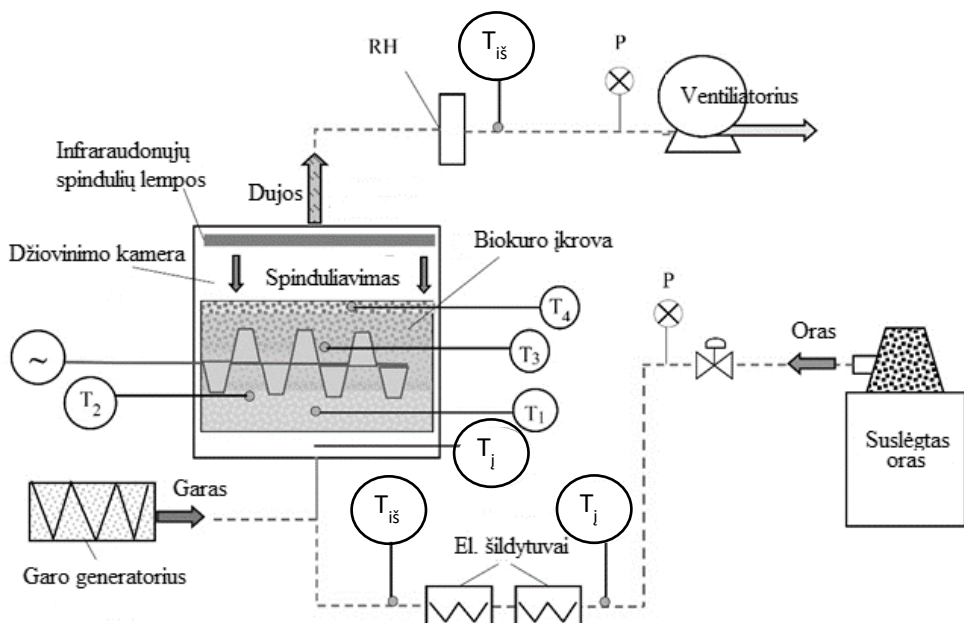
kur $r_{BH_{max}}$ – didžiausia bandinių drėgmės išsiskyrimo greičio reikšmė per visą matavimų laiką (g/s).

Šiam tyrimui atlikti buvo naudojami du smulkintos medienos bandiniai: šviežiai nukirsto ir susmulkinto medžio bandinys, 16 valandų mirkytas specialioje talpykloje, po to bandiniai 2 valandoms paliekami nusivarvėti patalpos temperatūroje. Antrąjį bandinį sudarė tos pačios rūšies (alksnio) smulkinta mediena kaip ir pirmojo, tačiau šis bandinys prieš mirkymą vandenyje buvo paliktas natūraliai džiuoti patalpos temperatūroje 48 valandas. Smulkintos alksnio medienos bandinių drėgmės kiekis prieš mirkymą buvo toks pat – apie 46 ± 1 % pagal masę. Drėgmės kiekis bandinyje nustatytas pagal standarto LST EN ISO 18134-1 reikalavimus ir apskaičiuotas pagal (1) formulę.

2.2.2. Tyrimų stendas smulkintos medienos bandinių drėgmės išsiskyrimui tirti

Smulkintos medienos drėgmės išsiskyrimas buvo tiriamas sukurtame eksperimentiniame stende, kurio principinė schema pavaizduota 2.5 paveiksle. Smulkintos medienos drėgmės išsiskyrimo tyrimų stendas sudarytas iš kelių pagrindinių dalių: džiovavimo kameros, elektrinių šildytuvų, garo generatoriaus ir infraraudonųjų spindulių lempų. Prieš atliekant tyrimus biokuro džiovavimo kameroje, smulkintos medienos bandiniai buvo ruošiami imituojant aplinkos veiksnių poveikio ir neišdžiūvusio biokuro tiekimą ant ardyno. Atkartojant drėgno, šalto biokuro patekimą į karštą pakurą, eksperimentinių tyrimų metu visa sistema pašildoma iki džiovavimo agento temperatūros. Kai džiovavimo kamera, kurios matmenys yra $0,355 \times 0,235 \times 0,280$ m, pasiekia užduotą temperatūrą, ji yra užpildoma paruoštu smulkintos medienos bandiniu. Smulkintos medienos sluoksnio aukštis buvo

parinktas toks (0,23 m), kad atitiktų tiekiamo biokuro sluoksnį ant ardyno 6MW pakuroje.



2.5 pav. Smulkintos medienos bandinių drėgmės išsiskyrimo eksperimentinio stendo schema

Siekiant nustatyti kuro sluoksnio išilimo bei drėgmės išsiskyrimo tendenciją džiovinimo metu (2.5 pav.), temperatūros jutikliai buvo integruoti skirtinguose biokuro sluoksnio aukščiuose. Pirmasis, trečiasis ir ketvirtasis jutikliai integruoti atitinkamame aukštyje pagal džiovinimo kameros vidurinę vertikalią ašį: T_1 – 3 cm, T_3 – 12 cm ir T_4 – 22 cm virš ardyno, antrasis temperatūros jutiklis T_2 buvo integruotas prie šoninės džiovinimo kameros sienos 10 cm aukštyje. Duomenų registratorius *PICO TC-08* su programine įranga buvo naudojamas temperatūros jutiklių rodmenims surinkti. Biokuro įkrovos vidutinis drėgmės kiekis įvertinamas išmatavus išeinančio oro drėgmę santykinio drėgmės jutikliu *Testo 454*.

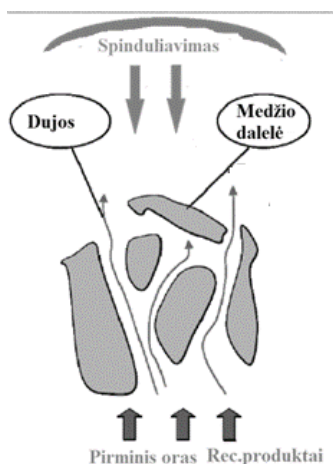
Kadangi vidutiniškai eksploatuojamose ardyninėse biokuro pakurose kuras ant ardyno iki visiško sudegimo išbūna apie 30 minučių (Martinez-garcia et al. 2015), o džiovinimo zona užima 1/3 pakuros ilgio, todėl faktinis laikas, praleistas šioje zonoje, yra maždaug 10 minučių. Atsižvelgus į šias sąlygas, buvo nustatyta maksimali eksperimentinių tyrimų trukmė, t. y. 30 minučių.

Eksperimentiniais tyrimais buvo siekiama nustatyti pirminio oro, išmetamųjų recirkuliacijos dūmų ir spinduliavimo nuo įkaitusių pakuros paviršių poveikį biokuro drėgmės išsiskyrimo procesui pakuroje (2.6 pav.). Tyrimų metu buvo tirti skirtingi veiksniai, turintys įtakos drėgmės išsiskyrimo procesui. Pirminio oro įtakai tirti, kad oras būtų pašildytas iki tam temperatūros (50, 100, 150 ir 200 °C) ir kad oro srauto greitis viso eksperimento metu būtų pastovus (t. y. $17,7 \pm 0,5 \text{ m}^3/\text{h}$), džiovinimui oras buvo tiekiamas iš suslėgto oro sistemos dviem elektriniais šildytuvais. Pašildyto oro

temperatūra matuojama K tipo termoporomis, sumontuotomis prieš ir už elektrinių šildytuvų.

Recirkuliacijos dūmų įtaka smulkintos medienos drėgmės išsiskyrimui buvo tirta naudojant pašildyto oro ir vandens garų mišinį. Į oro srautą įpurškiant vandens garus, džiovinimo agento absoliutusias drėgnis padidintas nuo 5 iki 17 g/m³. Iš anksto pašildyto oro ir vandens garų mišinio srautas buvo palaikomas toks pat, kaip ir tiriant tik pirminio oro įtaką ($17,7 \pm 0,5$ m³/h).

Galiausiai, imituojant spinduliavimą nuo įkaitusių vidinių pakuros paviršių, virš biokuro sluoksnio buvo sumontuoti du infraraudonųjų spindulių šildytuvai. Parinkti 2 kW IR šildytuvai atitiko 50 kW/m² pakuros spinduliuotės srautą. Džiovinimo oro srautas ir šiuo atveju buvo išlaikytas tose pačiose ribose bei tiekiamas per džiovinimo kameros apačią.



2.6 pav. Pakuros džiovinimo zonoje biokuro drėgmės išsiskyrimą lemiantys veiksniai (Sabelström 2007)

Eksperimentų metu taip pat buvo tiriama biokuro maišymo įtaka drėgmės išsiskyrimo intensyvumui. Šiuo tikslu džiovinimo kameroje buvo sumontuotas specialus sraigtinis maišytuvas, imituojantis 6 MW pakuroje esančių judančių ardelių judėjimą (2.5 pav.). Naudojant sraigtinį maišytuvą, apatinis bei vidurinis biokuro sluoksniai buvo iškeliami į viršų, o viršutinis sluoksnis išsklaidomas. Eksperimentinių tyrimų metu maišymo periodas buvo keičiamas maišant biokuro įkrovą kas 150 s, 300 s ir 600 s.

2.2.3. Gautų duomenų apdorojimas tarpusavio rezultatams palyginti

Tyrimų metu vidutinis smulkintos medienos bandinių drėgmės kiekis buvo vertinamas netiesioginiu metodu, t. y. apskaičiuojant pagal išmatuotą išeinančių dūmų drėgmę. Dūmuose esantis drėgmės kiekis ir temperatūra matuojami naudojant dujų analizatorių Testo 454. Išeinančių dūmų drėgmės pokytis laiko momentu nustatomas apskaičiuojant bandinių drėgmės išsiskyrimo greitį g_{H_2O} pagal šią (6) lygtį:

$$g_{H_2O} = h_g \cdot \frac{V_{oro} + V_{H_2O(g)}}{3600} \left(\frac{273 + T_d}{273 + T_{apl}} \right); \quad (6)$$

čia V_{oro} – sauso oro srautas (m^3/h); $V_{H_2O(g)}$ – vandens garų srautas m^3/h ; h_g – drėgmės kiekis išeinančiuose dūmuose (g/m^3); T_d – išeinančių dūmų temperatūra ($^{\circ}C$); T_{apl} – aplinkos temperatūra ($^{\circ}C$).

Vandens garų srautas apskaičiuojamas pagal (7) lygtį:

$$V_{H_2O(g)} = V_{H_2O(kuro)} + V_{H_2O(rec.pr.)}; \quad (7)$$

čia $V_{H_2O(kuro)}$ – drėgmės kiekis sraute, susidaręs džiūstant bandiniui (m^3/h); $V_{H_2O(rec.pr.)}$ – drėgmės kiekis sraute įvedus į srautą $17 g/m^3$ vandens garo, imituoiant recirkuliacijos dūmų patekimą į pakurą (m^3/h).

Kadangi buvo siekiama išlaikyti tą patį smulkintos medienos įkrovos aukštį, pradinė bandinių masė visų bandymų metu skyrėsi, be to, tai lėmė ir nevienoda bandinių sudėtis. Pradinis drėgmės kiekis bandiniuose taip pat svyravo tarp $60 \pm 3\%$. Dėl šios priežasties rezultatų apdorojimo metu drėgmės kiekio biokure vertės buvo normalizuojamos pagal didžiausią ΔY_{max} ir mažiausią (Holmberg et al. 2011) ΔY_{min} drėgmės kiekį ir sauso bandinio masės santykio vertę per visą tyrimo atlikimo laikotarpį, t. y. per 30 minučių ((8) ir (9) lygtys).

$$\Delta Y_{max} = \frac{m_i - m_s}{m_s}; \quad (8)$$

ir

$$\Delta Y_{min} = \frac{m_i - m_s}{m_s}; \quad (9)$$

čia m_i – bandinio masė (g) laiko momentu t_i ir m_s – sauso bandinio masė (g), kuri apskaičiuojama pagal (10) lygtį:

$$m_i = m_{i-1} - m_{H_2O(i)}; \quad (10)$$

čia m_{i-1} – bandinio masė laiko momentu t_{i-1} (g); $m_{H_2O(i)}$ – drėgmės kiekis išeinančiuose dūmuose (g), kur drėgmės kiekio vertės dūmuose $m_{H_2O(1)}$, $m_{H_2O(2)}$, $m_{H_2O(3)} \dots m_{H_2O(i)}$ laiko momentu $t_1, t_2, t_3 \dots t_i$ ir apskaičiuojama pagal (11) lygtį:

$$m_{H_2O(i)} = g_{H_2O(i)} \cdot \Delta t; \quad (11)$$

čia $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ – drėgmės kiekio išeinančiuose dūmuose matavimų periodas. Dėl smulkintos medienos bandinių drėgmės išsiskyrimo žemo intensyvumo pasirinktas 5 sekundžių duomenų surinkimo žingsnis.

Normalizuojant drėgmės kiekį Y_m (sant. vnt.) smulkintos medienos bandiniuose, maksimalus bandinių masės santykis prilyginamas 1 ir santykiniais vienetais apskaičiuojamas pagal (12) formulę:

$$Y_m = 1 - (\Delta Y_{max} - \Delta Y_{min}); \quad (12)$$

2.3. Virtualaus jutiklio pritaikymo biokuro pakurai reguliuoti pagal nustatytą drėgmės kiekį biokure tyrimo metodika

Virtualaus jutiklio pritaikymo tyrimai atlikti bendrovės „Axis Technologies“ (Garliavoje) įrengtoje kietuoju biokuru kūrenamoje katilinėje (2.7 pav.). Katilinėje

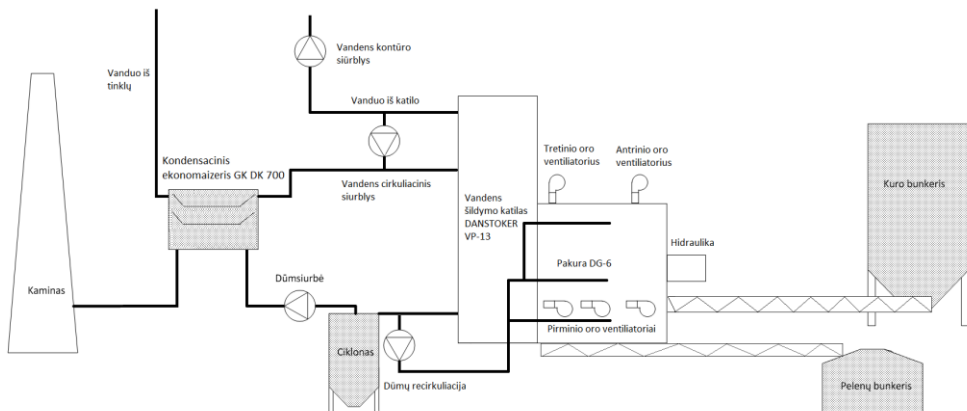
sumontuotas vandens šildymo katilas XILO SV. Danų gamybos vandens šildymo katilas DANSTOKER VP-13 sukomplektuotas su recirkuliaciniu katilo kontūro vandens siurbliu, cirkuliaciniu siurbliu, mechanizuota biokuro (smulkinta mediena) deginimo pakura (DG-6), kurią sudaro pakuros korpusas, pakuros mūras su 100–150 mm storio aukštatemperatūrėmis izoliacinėmis plokštėmis, biokuro bunkeris su žertuviniu maitintuvu, pakuros ardymas su judančiomis ardelėmis, pelenų kanalas ir jų šalinimo sistema, oro vamzdynas su sklendėmis ir su oro pūtimo ventiliatoriais (I, II, III oras), recirkuliacijos vamzdynai su recirkuliacijos ventiliatoriumi, hidraulikos sistema. 2.3 lentelėje pateikti pakuros techniniai duomenys.

2.3 lentelė. Pakuros techniniai duomenys

Parametras	Matavimo vnt.	Vertė
Projektinė galia	MW	6
Darbinė galia	MW	5,2
Biokuro bunkerio talpa	m ³	5
Maksimalūs biokuro gabaritai	mm	5x20x50
Leistinas drėgmės kiekis biokure	%	30...55
Apkrovimo diapazonas	%	30...100
Oro pertekliaus koeficientas		1,4
Degimo produktų, išeinančių iš pakuros, temperatūra	°C	900...1100
Biokuro sąnaudos 1 MW pakurai, ne daugiau	kg/h (m ³ /h)	530 (1,74)
Biokuro žemutinis kaloringumas, esant 40 % drėgmės kiekiui: susmulkintos medienos susmulkintos medienos ir durpių mišinio	kcal/kg kcal/kg	2440 1750
Katilo su pakura naudingo veikimo koeficientas, esant ne mažesniai kaip 40 % drėgmės kiekiui biokure		0,89
Biokuro pelningumas	%	1,5...5,5

Bandymų metu biokuras žertuviniais maitintuvais paduodamas į pakurą. Slysdamas ardynu kuras patenka į pirmą zoną, kurioje intensyviai džiovinamas veikiamas aukštos temperatūros ir pirminio oro, paduodamo iš po ardyno. Antroje zonoje prasideda kuro dujųofikacija, virš kuro sluoksnio paduodamas antrinis oras dujoms sudeginti. Trečioje zonoje kuras optimaliai sudega ir pelenai patenka į pelenų kanalą. Išsiskyrusios dujos visiškai sudeginamos paduodant tretinį orą į pakuros ir vandens šildymo katilo sujungimo kanalą. Išeinančių iš pakuros į katilą dūmų

temperatūra priklauso nuo apkrovimo ir kinta nuo 900 iki 1100 °C. Degant sausesniam biokurui (mažiau kaip 40 % drėgmės pagal masę), didėja ardymo, pakuros temperatūra, kuri mažinama naudojant dūmų recirkuliaciją. Kita dūmų dalis keliauja į sumontuotą multicikloną kietosioms dalelėms išvalyti. Iš multiciklono dūmai dūmsiurbe transportuojami į išeinančių dūmų kondensacinį ekonomaizerį (DKE) (gamintojas – bendrovė „Axis Technologies“). Čia į dūmus purškiamas vanduo, kuris dūmus ataušina iki rasos taško temperatūros. Kondensatas suteka į ekonomaizerio apačioje įrengtas talpyklas, iš kurių siurbliais pumpuojamas per plokštinius šilumokaičius, kuriuose kondensatas ataušinamas iš miesto tinklų grįžtančiu termofikaciniu vandeniu. Dūmai, kurių temperatūra 46–56 °C, iš ekonomaizerio į atmosferą išmetami dūmsiurbe.



2.7 pav. Principinė vandens šildymo katilo įrenginių schema

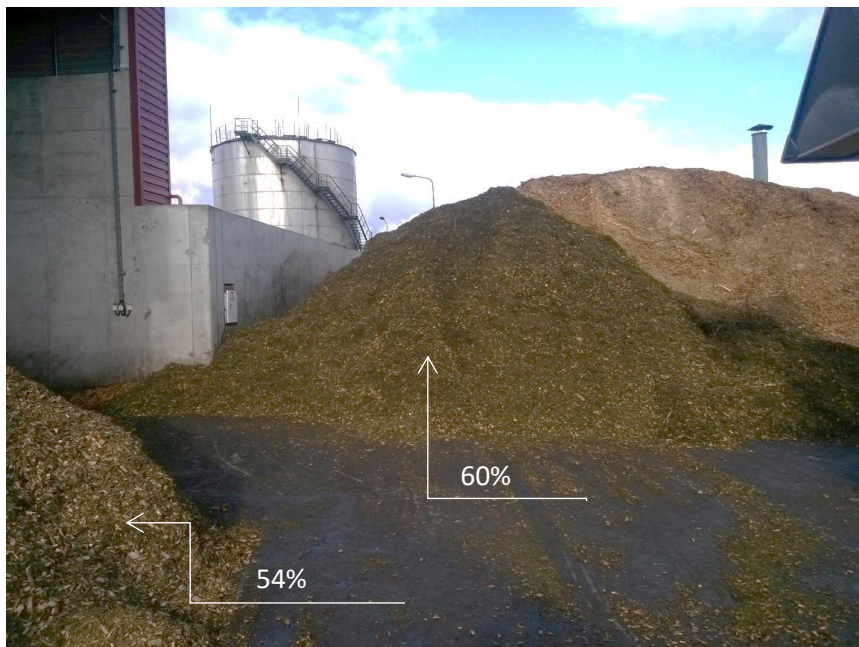
Dūmų recirkuliacija, kaip ir biokuro padavimas, degimo palaikymas ir pelenų pašalinimas vyksta automatinio režimu priklausomai nuo dūmų temperatūros prieš katilą. Sudegusio biokuro pelenai žertuvais transportuojami iš kūryklos į lauke sumontuotą bunkerį.

Bandymų metu pakuros darbas buvo koreguojamas rankiniu būdu, kad būtų sureguliuoti pasirinkto režimo parametrai.

2.3.1. Bandymams naudoto biokuro charakteristikos

Eksperimentinių tyrimų metu tirtas šilumos gamybos technologinis įrenginys veikė į pakurą tiekiant skirtingos drėgmės smulkintos medienos biokurą. Eksperimentai buvo vykdomi kelias dienas į pakurą paduodant 44–60 % drėgmės pagal masę smulkintos medienos biokurą. Biokuras buvo padalintas į dvi krūvas (2.8 pav.) pagal drėgmės kiekį ir rankiniu būdu tiekiamas į biokuro padavimo sistemą pasirinktais laiko tarpais. Pakeitus biokurą iškart buvo imami bandiniai tiesioginiams drėgmės kiekio biokure tyrimams. Pagrindinės biokuro savybės nustatytos remiantis Lietuvos Respublikos standartuose LST EN 14774-1, LST EN 14775 ir LST EN 14918 nustatytais reikalavimais. Matavimams naudoti šie prietaisai: elektroninės svarstyklės ABT 220-5DM, džiovinimo krosnelė 2V-151, aukštatemperatūrė krosnelė

SNOL 1,6,2,5.1/9IZ ir kalorimetras IKA C5000. Pagrindinės smulkintos medienos biokuro charakteristikos pateiktos 4.1 lentelėje.

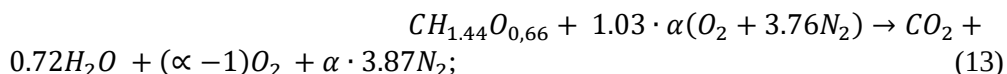


2.8 pav. Bandymų metu naudotas skirtingo drėgnumo biokuras

2.3.2. Drėgmės kiekio smulkintos medienos biokure nustatymas remiantis DKE šilumos balanso lygtimis

Drėgmės kiekio smulkintos medienos biokure įvertinimo metodas buvo pagrįstas DKE šilumos balansu. Norint apskaičiuoti šilumos balansą, iš sistemos SCADA surenkami šie proceso parametrai: išmetamųjų dūmų ir vandens temperatūros prieš ir už kondensacinio ekonomaizerio, išmetamųjų dūmų ištraukimo ventiliatorių dažnis ir katilo galia. Siekiant įvertinti drėgmės kiekį išmetamuosiuose dūmuose, šiluminė DKE galia padalinta į du komponentus: šilumos kiekį, išgautą iš fizinės sausų išmetamųjų dūmų šilumos, ir šilumos kiekį, išgautą susikondensavus vandeniui, esančiam išmetamuosiuose dūmuose.

Pirmojo komponento skaičiavimai buvo pagrįsti idealaus (visiškai sauso ir be degių mineralinių priemaišų) biokuro degimo reakcija, aprašyta (13) lygtimi (Nussbaumer 2003):



čia $CH_{1.44}O_{0.66}$ yra vidutinė sauso biokuro, naudojamo deginimui, sudėtis, o α – oro pertekliaus koeficientas.

Pagal degimo reakcijoje dalyvaujančių cheminių elementų atominę masę (14), apskaičiuota, kad 1 kg biokuro (m_F) sudeginti reikia 5,89 kg sauso oro (m_{O_2}), iš kurių gaunama 6,89 kg degimo produktų (m_D), kuriuose yra 1,83 kg anglies dioksido, 0,54

kg vandens garų (m_{H_2O}) ir 4,52 kg azoto. Tokiu atveju drėgmės kiekis sausuose išmetamuosiuose dūmuose h_D apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$h_D = \frac{m_{H_2O}}{m_D - m_{H_2O}}; \quad (14)$$

Naudojant parametrus, apskaičiuotus iš degimo reakcijos (13), šiluma, išgauta iš sausų išmetamųjų dūmų, yra apskaičiuojama padauginus pagamintą sausų išmetamųjų dūmų kiekį iš išmetamųjų dūmų, patenkančių ir išėinančių iš ekonomaizerio, entalpijų skirtumo:

$$Q_{fg}^{dry} = \frac{Q_B m_D}{Q_z \eta m_F} \cdot (c_{p1} T_{fg} + (c_{p2} + c_{p,wv} T_{fg}) h_D - c_{p1} T_{fg1} - h_{D1} (c_{p2} + c_{p,wv} T_{fg1})); \quad (15)$$

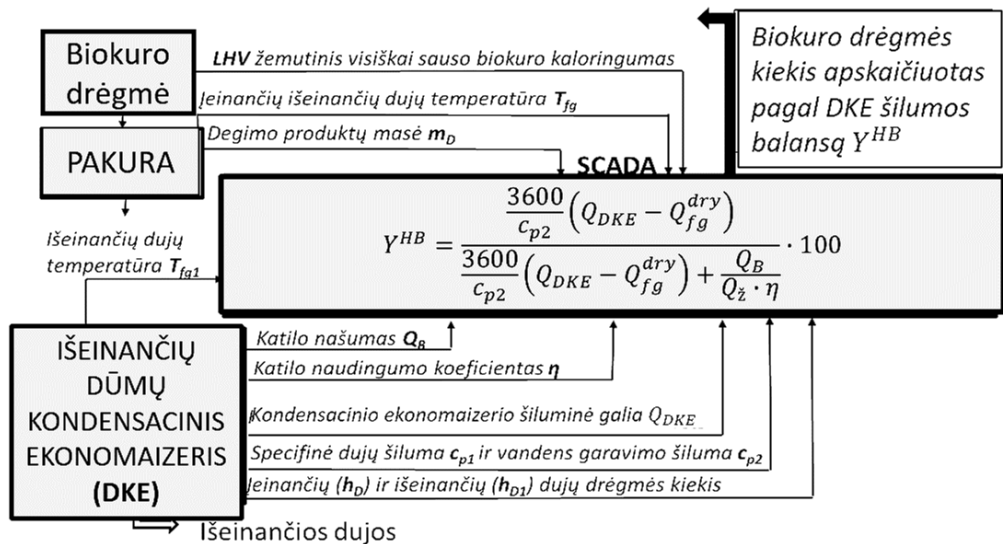
čia Q_{fg}^{dry} yra DKE išgautas šilumos kiekis, išreikštas kJ/kg, apskaičiuotas iš išmetamųjų dūmų kiekio, kuris apskaičiuojamas iš tiekiamo biokuro kiekio, reikalingo norint palaikyti užsiduotą katilo našumą Q_B , ataušinant įeinančius išmetamuosius dūmus T_{fg} , °C iki išėinančių išmetamųjų dūmų temperatūros T_{fg1} , °C, kai drėgmės kiekis sausuose išmetamuosiuose dūmuose sumažėja nuo h_D iki h_{D1} ; c_{p1} – savitoji sausų išmetamųjų dūmų šiluma, kJ/kg K; $c_{p2}=2500$ kJ/kg K yra savitoji vandens garavimo šiluma, $c_{p,wv}=1,8$ kJ/kg·K – savitoji vandens garo šiluma, kJ/kg K; η – katilo naudingumo koeficientas, lygus 0,89 pagal katilo specifikaciją; Q_z – žemutinis visiškai sauso smulkintos medienos biokuro šilumingumas, 18000 kJ/kg; ir h_{D1} – likutinės drėgmės kiekis, išreikštas sausų išmetamųjų dūmų masės frakcija, apskaičiuotas pagal (BUKHARKIN 1997):

$$h_{D1} = 0.004 \cdot 10^{T_{fg1}/37.6}; \quad (16)$$

Drėgmės kiekis išmetamuosiuose dūmuose, susidarantis deginant drėgną smulkintą medieną biokurą, nustatomas atimant apskaičiuotą šilumos kiekį sausuose išmetamuosiuose dūmuose iš DKE šiluminės galios, nurodytos valdymo skyde, bei padalinus gautą skirtumą iš savitosios vandens garavimo šilumos reikšmės $c_{p2}=2500$ kJ/kg K (žr. (17) formulę):

$$m_{mfg}^{HB} = \frac{3600}{c_{p2}} (Q_{DKE} - Q_{fg}^{dry}); \quad (17)$$

čia m_{mfg}^{HB} – išmetamuosiuose dūmuose esantis drėgmės kiekis, apskaičiuotas iš ekonomaizerio šilumos balanso, kg/h; Q_{DKE} yra kondensacinio ekonomaizerio šiluminė galia, kW; o koeficientas 3600 skirtas konversijai tarp sekundžių ir valandų, kad būtų gautas drėgmės kiekis per valandą.



2.9 pav. Įeinančių ir išeinančių duomenų matavimų schema apskaičiuoti drėgmės kiekį biokure pagal DKE šilumos balanso metodą

Apskaičiuotas drėgmės kiekis išmetamuosiuose dūmuose perskaičiuojamas į biokuro drėgmės kiekį, taikant (18) lygtį:

$$Y^{HB} = \frac{m_{mf}^{HB}}{m_{mf}^{HB} + \frac{Q_B}{LVH \cdot \eta}} \cdot 100; \quad (18)$$

čia Y_{HB} yra biokuro drėgmės kiekis, apskaičiuotas pagal DKE šilumos balanso metodą (%). Skaiciavimo schema pateikta 2.9 pav.

2.4. Eksperimentinių bandymų rezultatų apdorojimas

Atliekant eksperimentinius bandymus, matuojami tam tikri fizikiniai dydžiai, kurie nusako objektų ar reiškinių esmines savybes. Matuojant gautojo duomens ir tikrojo (paprastai niekuomet nežinomas) matuojamojo dydžių verčių skirtumas vadinamas matavimo klaida. Tačiau tikroji vertė negali būti rasta, nes neįmanoma atlikti absoliučiai tobulo matavimo. Tačiau išmatuoti dydžiai skiriasi nuo tikrųjų matuojamų dydžių verčių. Šių verčių skirtumas vadinamas matavimo paklaida. Matavimo paklaidos skirstomos į sistemingasias ir atsitiktines. Siekiant nustatyti matavimų patikimumą, reikia nustatyti matavimo rezultatų netikslumo įvertį – matavimo neapibrėžtį. Matavimo neapibrėžtis apibūdina verčių, kurios priskiriamos matuojamam dydžiui, sklaidą.

Smulkintos medienos bandinių drėgmės išsiskyrimo intensyvumo rezultatai apdoroti programine įranga „Microsoft Excel“ (LEI licencija), pasinaudojant įdiegtomis neapibrėžčių įvertinimo funkcijomis.

Kiekvienas tiesiogiai matuojamas įėjimo dydis turi vieną ar kelis neapibrėžties šaltinius. Kiekvieno neapibrėžties šaltinio įtaka išėjimo dydžio neapibrėžčiai įvertinama įėjimo dydžio standartinė neapibrėžtimi. Pastaroji apibūdinama

standartiniu nuokrypiu. Standartinėms neapibrėžtims vertinti darbe naudoti du – A ir B tipo neapibrėžčių indėliai.

Standartinės neapibrėžties įvertinimo A tipas buvo taikomas, turint įėjimo dydžio n nepriklausomų matavimo rezultatų, gautų esant toms pačioms matavimo sąlygoms.

Eksperimentiniuose bandymuose matuojant įėjimo dydį X , gaunamos vertės $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Tuomet apskaičiuojamas įėjimo dydžio verčių aritmetinis vidurkis $\bar{x}$ (įvertis):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (19)$$

čia: n – matavimų kiekis; x_i – i -tojo matavimo reikšmė.

Apskaičiuojamas eksperimentinis standartinis nuokrypis $s(\bar{x})$:

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; \quad (20)$$

Nekoreliuoto įėjimo eksperimentinio išmatuoto dydžio x vidurkio standartinis nuokrypis $u(\bar{x})$:

$$u(\bar{x}) = \frac{s(\bar{x})}{\sqrt{n}}; \quad (21)$$

Vertinant standartinę neapibrėžtį B tipu, galimi įvairūs atvejai. Įvertinant šio būdo neapibrėžtį, remtasi prietaisų gamintojų specifikacijomis, kalibravimo liudijimais, žinynais ar kita moksline literatūra. Vertinant eksperimentinius rezultatus, išplėstinių matavimų neapibrėžtims skaičiuoti pasirinktas normalusis (Gauso) skirstinys. Šio dėsnio standartinis aprėpties daugiklis priklauso nuo laisvės laipsnio ($\nu=n-1$), kai pasikliautinė tikimybė P yra 95%, randamas standartinėse lentelėse.

$$u(\bar{x}) = \frac{a}{2}; \quad (22)$$

Vertinant prietaisų rodmenų atskaitymo neapibrėžtį, naudotas stačiakampio pasiskirstymo dėsnis. Remiantis šiuo dėsniu, standartinė neapibrėžtis apskaičiuojama taip:

$$u(\bar{x}) = \frac{a}{2} \sqrt{3}; \quad (23)$$

čia a – įėjimo dydžio sklaidos intervalas.

Šiame darbe nekoreliuotų įėjimo dydžių $Y = F(h_g, V_{oro}, V_{H_2O(g)}, T_d)$, išėjimo įverčio matavimo suminė standartinė neapibrėžtis $u(y)$ apskaičiuojama pagal lygtį, kur neapibrėžčių indėliai: $u_{B(h_g)}$ – drėgmės jutiklio kalibravimo neapibrėžtis, $u_{A(h_g)}$ – neapibrėžtis dėl eksperimentinės matavimo sklaidos, $u_{r(h_g)}$ – drėgmės jutiklio nuskaitymo neapibrėžtis, $u_{B(V_{oro})}$ – rotometro kalibravimo neapibrėžtis, $u_{A(V_{oro})}$ – neapibrėžtis dėl eksperimentinės matavimo sklaidos, $u_{r(V_{oro})}$ – rotometro nuskaitymo neapibrėžtis, $u_{B(V_{H_2O(g)})}$ – aspiratoriaus kalibravimo neapibrėžtis, $u_{A(V_{H_2O(g)})}$ –

neapibrėžtis dėl eksperimentinės matavimo sklaidos, $u_{r(V_{H_2O(g)})}$ – aspiratoriaus nuskaitymo neapibrėžtis, $u_{B(T_d)}$ – temperatūrinio jutiklio kalibravimo neapibrėžtis, $u_{A(T_d)}$ – neapibrėžtis dėl eksperimentinės matavimo sklaidos, $u_{r(T_d)}$ – aspiratoriaus nuskaitymo neapibrėžtis.

$$u(y) = \left(\sqrt{u_{A(h_g)}^2 + u_{A(V_{H_2O(g)})}^2 + u_{A(V_{oro})}^2 + u_{A(T_d)}^2 + u_{B(h_g)}^2 + u_{B(V_{H_2O(g)})}^2 + u_{B(V_{oro})}^2 + u_{B(T_d)}^2 + u_{r(h_g)}^2 + u_{r(V_{H_2O(g)})}^2 + u_{r(V_{oro})}^2 + u_{r(T_d)}^2} \right) * |c_i|; \quad (24)$$

Modelio funkcijos dalinė išvestinė pagal įėjimo įvertį h_g , V_{air} , $V_{H_2O(g)}$, T_g yra vadinama įtakos koeficientu, $c_i(\bar{x})$, kuris darbe buvo apskaičiuojamas taip:

$$c_i(\bar{x}) = \frac{\partial(g_{H_2O})}{\partial(h_g)} = \frac{\partial(g_{H_2O})}{\partial(V_{oro})} = \frac{\partial(g_{H_2O})}{\partial(V_{H_2O(g)})} = \frac{\partial(g_{H_2O})}{\partial(T_d)}; \quad (25)$$

Išėjimo dydžio matavimo išplėstinė neapibrėžtis U skaičiuojama dauginant sklaidos dėsnio aprėpties daugiklį k iš suminės standartinės neapibrėžties $u(y)$:

$$U = k * u(y); \quad (26)$$

Kaip galutinis matavimo rezultatas yra pateikiamas matuojamo dydžio Y įvertis ($\bar{y}$) ir išplėstinė matavimo neapibrėžtis U , esant tikimybei $P = 95\%$:

$$Y = \bar{y} \pm U; \quad (27)$$

Matuojamo dydžio Y santykinė neapibrėžtis $\partial(Y)$ išreiškiama taip:

$$\partial(y) = \frac{U}{\bar{y}} 100\%; \quad (28)$$

Atliekant eksperimentinius bandymus kiekvienas įėjimo dydis buvo matuojamas ne mažiau kaip po penkis kartus. Vieno matavimo neapibrėžties analizė (struktūra), apimanti visų neapibrėžties šaltinių kartu su susijusiomis standartinėmis matavimo neapibrėžtimis ir jų vertinimo metodus, bei matuotų išėjimo dydžių galutiniai rezultatai pateikti 2.4 lentelėje.

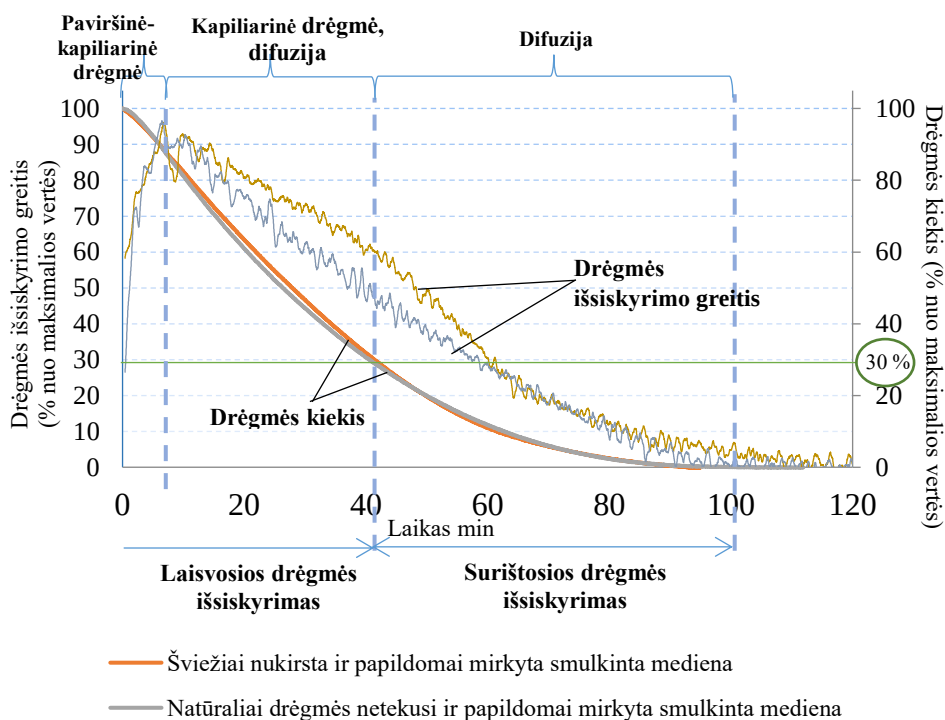
2.4 lentelė. Matavimo dydžiai ir jų neapibrėžtys, esant nekoreliuotiems įėjimo dydžiams

Matuojamas dydis / matavimo įranga, neapibrėžtis	Įvertis	Išplėstinė neapibrėžtis	Skirstinys	Standartinė neapibrėžtis	Įtakos koeficientas	Standartinė neapibrėžtis
Y	$\bar{x}$	$U(\bar{x})$		$u(\bar{x})$	$c_i(\bar{x})$	$u_y(\bar{x}) = u(\bar{x}) * c_i(\bar{x})$
h_g /drėgmės jutiklis, kalibravimo neapibrėžtis	949,2	18,9838	Normalusis	9,4919	1	9,4919
h_g /drėgmės jutiklis, eksperimentinių matavimų neapibrėžtis	949,2		Normalusis	0,0738	4,466	0,3297
h_g /drėgmės jutiklis, rodmenų atskaitymas	0,1	0,05	Stačiakampis	0,0289	1	0,0289
V_{oro} /rotametro RM, kalibravimo neapibrėžtis	17,6	0,2998	Normalusis	0,1499	1	0,1499
V_{oro} /rotametro RM, eksperimentinių matavimų neapibrėžtis	17,6		Normalusis	0,0152	1,179	0,0179
V_{oro} /rotametro RM, rodmenų atskaitymas	0,1	0,5	Stačiakampis	0,2887	1	0,2887
$V_{H_2O(g)}$ /aspiratorius ZB1, kalibravimo neapibrėžtis	5,17	0,1293	Normalusis	0,0646	1	0,0646
$V_{H_2O(g)}$ /aspiratorius ZB1, eksperimentinių matavimų neapibrėžtis	5,17		Normalusis	0,0141	1,179	0,0167
$V_{H_2O(g)}$ /aspiratorius ZB1, rodmenų atskaitymas (kiek skaičių po kablelio)	0,01	0,05	Stačiakampis	0,0289	1	0,0289
T_d/K tipo temperatūros jutiklis, kalibravimo neapibrėžtis	1,237	0,0124	Normalusis	0,0062	1	0,0062
T_d/K tipo temperatūros jutiklis, eksperimentinių matavimų neapibrėžtis	1,237		Normalusis	0,0001	0,285	0,0000
T_d/K tipo temperatūros jutiklis, rodmenų atskaitymas	0,1	0,05	Stačiakampis	0,0289	1	0,0289

3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

3.1. Drėgmės išsiskyrimo pobūdis smulkintos medienos biokuro bandiniuose

Lietuvos biokuro katilinėse deginimui skirtas biokuras yra sandėliuojamas lauke ir, prieš patekdamas į pakurą, būna paveiktas aplinkos veiksnių. Biokuras, laikomas po atviru dangumi, dėl oro sąlygų kaitos nuolat drėksta arba džiūva, o kartais, kaip jau buvo minėta, gali įdrėkti net iki 60 % ir daugiau pagal masę. Žinant biokuro laikymo sąlygas, būtina įsitikinti, ar biokuro bandinių įdrėkinimas iki 60 % realiai atitinka pristatomą biokurą, ar dirbtinai įdrėkinto ir realiai sandėliuojamo biokuro drėgmės išsiskyrimo tendencija tokia pat, ar toks bandinių paruošimas yra tinkamas. Siekiant optimaliai atkartoti realias biokuro pristatymo ir tiekimo į pakurą sąlygas bei įsitikinti tyrimo metodikos tikslumu bei patikimumu, atliktas papildomas biokuro drėgmės išsiskyrimo tyrimas mažame stacionariame tūryje. Tyrimo metu tirta natūraliai drėgmės netekusi ir dar kartą sudrėkinta smulkinta mediena bei šviežiai nukirsta ir papildomai drėkinta smulkinta mediena. Eksperimentiškai gautos drėgmės išsiskyrimo bei drėgmės išsiskyrimo greičio priklausomybės nuo laiko pateiktos grafiškai 3.1 pav.



3.1 pav. Smulkintos medienos bandinių drėgmės kiekio pokyčio ir drėgmės išsiskyrimo greičio priklausomybė nuo laiko

Medienoje esantis vanduo pagal ryšį yra klasifikuojamas į dvi rūšis – laisvąjį ir chemiškai surištajį. Tokiu būdu ir drėgmės išsiskyrimo procesą (Chan et al. 2018; McKendry 2002) galima suskirstyti į du etapus – kai pasišalina laisvoji ir surištoji drėgmė. Laisvoji drėgmė, esanti biokuro paviršiuje, priklauso nuo biokuro frakcijos ir sudaro du trečdalius visos medienoje esančios drėgmės. Surištoji drėgmė kaupiasi tik ląstelių sienelėse ir, nepaisant medienos rūšies, jos kiekis dažnu atveju neviršija 30 % visos medienoje esančios drėgmės. Švedijos mokslininkai, viename iš savo darbų (Bengtsson 2004) tirdami lakiųjų organinių junginių (LOJ) komponentų išsiskyrimą lapuočių ir spygliuočių smulkintos medienos drėgmės išsiskyrimo metu, iš drėgmės išsiskyrimo greičio kreivių išskyrė tris pagrindinius drėgmės išsiskyrimo etapus: paviršinės kapiliarinės drėgmės išsiskyrimas, kapiliarinės drėgmės išsiskyrimas bei difuzija.

Pirmasis etapas – paviršinės kapiliarinės drėgmės išsiskyrimas iš smulkintos medienos, kurio metu intensyviai didėja drėgmės išsiskyrimo greitis, vyksta staigus drėgmės pokytis (3.1 pav.). Nustatyta, kad, pradėjus medienos drėgmės išsiskyrimo procesą, vanduo pirmiausiai nugaruoja nuo paviršiaus, tada pasišalina iš kapiliarų. Nustatyta, kad šiame drėgmės išsiskyrimo etape, džiovinant šviežiai kirsto medžio skiedras drėkintas ar natūraliai praradusias drėgmę ir papildomai drėkintas, drėgmės išsiskyrimo greičio kitimas laiko atžvilgiu nesiskiria. Paviršinė drėgmė, esanti medienos dalelių paviršiuje bei paviršiaus sluoksnio kapiliaruose, tyrimo metu prarandama per pirmąsias 7 minutes.

Kai drėgmės išsiskyrimo greitis stabilizuojasi ir pradeda mažėti, tuomet galima išskirti antrą medienos drėgmės išsiskyrimo etapą – laisvosios drėgmės, esančios medienos ląstelėse, išsiskyrimą. Laisvasis vanduo, esantis medienos ląstelėse, skverbiasi į medienos dalelių paviršių, kur jis išgarinamas. Mažėjant paviršinės laisvosios drėgmės kiekiui, riba tarp skysčio ir dujinės vandens fazės nuosekliai skverbiasi gilyn link medienos dalelės centro, todėl šiame etape išsiskiria ne tik kapiliarinė drėgmė, bet ir surištoji drėgmė, esanti medienos ląstelių sienelėse. Surištoji drėgmė išsiskiria tik difuzijos proceso metu, kai iš medienos ląstelių sienelių drėgmė difunduoja į mažesnės vandens molekulių koncentracijų vietas.

Bandymo metu naudotų medienos skiedrų bandinių paviršiaus plotas kiekvieno tyrimo metu kito nežymiai ir, kaip matyti iš pateikto paveikslėlio, džiovinant šviežiai kirsto ir džiovinant bei papildomai mirkytų medienos skiedrų bandinių drėgmės išsiskyrimo greitis kapiliarinės drėgmės išsiskyrimo ir difuzijos proceso metu skyrėsi taip pat nežymiai – iki 10 %.

Iš gautų drėgmės išsiskyrimo kreivių galime išskirti ir paskutinį smulkintos medienos drėgmės išsiskyrimo etapą, t. y. difuziją – surištosios drėgmės išsiskyrimas, kurį savo darbuose aprašė ir kinų mokslininkai, atlikę eksperimentinius medienos pjuvenų džiovinimo tyrimus verdančio sluoksnio reaktoriuje (Liu et al. 2014). Smulkintos medienos bandiniuose surištosios drėgmės išsiskyrimas prasideda išgaravus ne mažiau 2/3 visos drėgmės. Medienoje likus tik surištajai drėgmei, t. y. maždaug 30 % drėgmės pagal masę, galimas savaiminis medienos užsidegimas bei liepsnos plitimas, kadangi toks drėgmės kiekis medienoje nebestabdo degimo proceso ir užtikrina, kad jis vyktų stabiliai ir efektyviai (Andersson et al. 2006; Nyström, Dahlquist 2004). Abiejų tirtų smulkintos medienos bandinių drėgmės išsiskyrimo

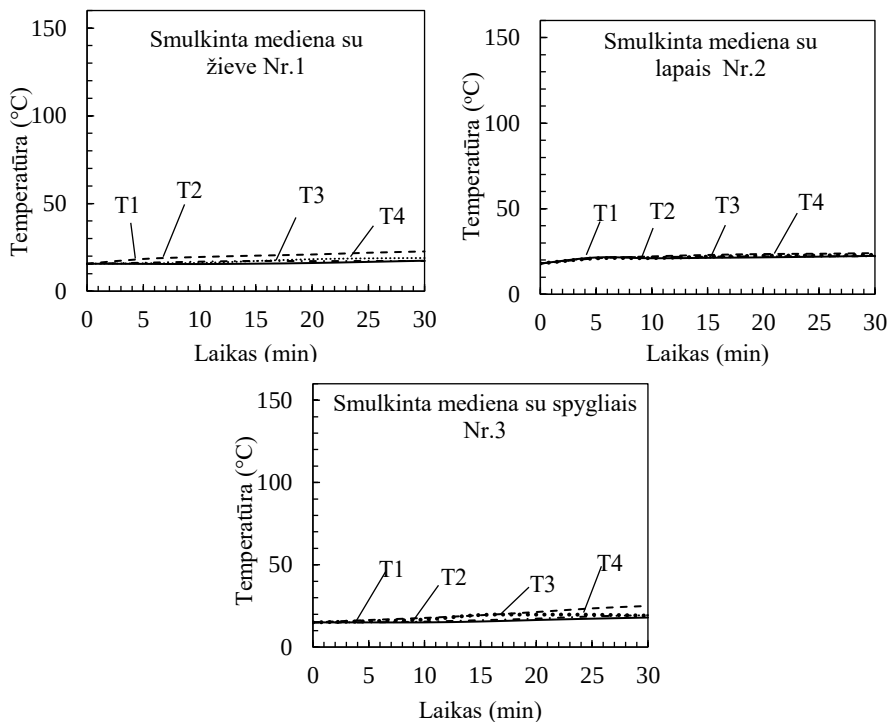
tendencija panaši ir ši drėgmės kiekį (30 %) bandymo metu pasiekė po 40 minučių nuo eksperimentinio tyrimo pradžios. Po 100 minučių nuo eksperimento pradžios drėgmės išsiskyrimo greitis ir drėgmės kiekio pokytis stabilizuojasi (sumažėja iki nulio), todėl galime teigti, kad biokuro drėgmės išsiskyrimo procesas baigėsi.

Atlikti tyrimai parodė, kad biokuro mirkymas vandenyje 16 h yra tinkamas, norint smulkintos medienos bandinyje pasiekti 60 % drėgmę pagal masę. O atlikto drėgmės išsiskyrimo tyrimo mažame stacionariame tūryje rezultatai atskleidė, kad smulkintos medienos biokuro drėgmės išsiskyrimo pobūdis toks pat arba labai panašus nepriklausomai nuo drėgmės prigimties.

3.2. Pirminio oro įtaka stacionaraus smulkintos medienos biokuro sluoksnio drėgmės išsiskyrimui

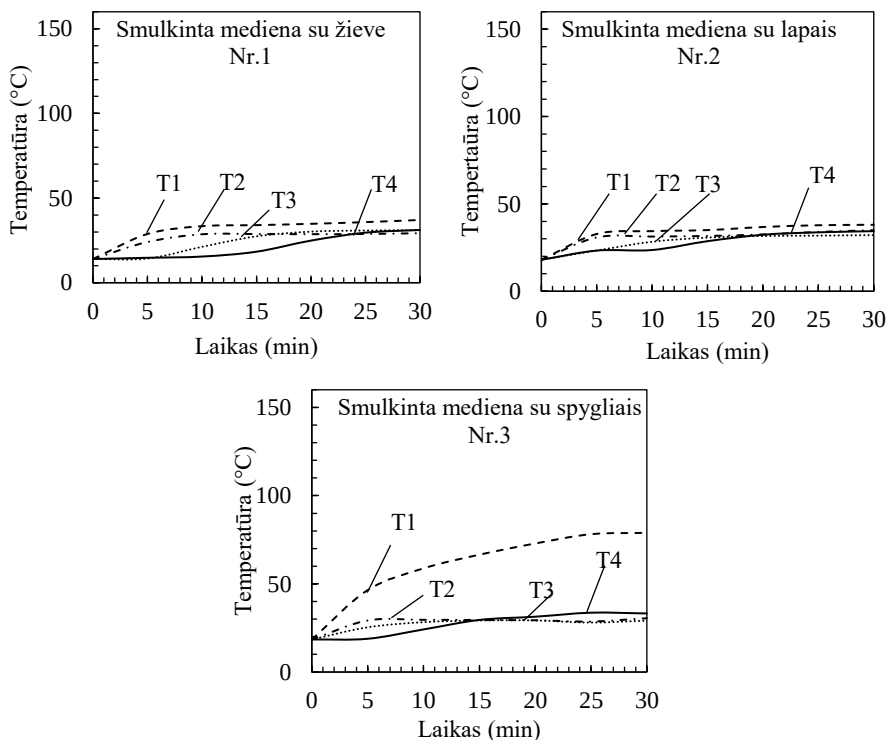
3.2.1. Temperatūros pasiskirstymas smulkintos medienos biokuro sluoksnyje

Prieš tai skyriuje aptartas dirbtinai įdrėkinto ir realiai pristatomo į biokuro katilinę smulkintos medienos biokuro drėgmės išsiskyrimo pobūdis. Išanalizavus rezultatus ir įsitikinus pasirinktos metodikos tikslumu, atlikti tokie drėgmės išsiskyrimo intensyvumo eksperimentiniai bandymai, kurių metu buvo naudoti trys skirtingų frakcijų smulkintos medienos bandiniai (2.1 pav.): smulkintos medienos su žieve (Nr. 1); smulkintos medienos su lapais (Nr. 2); smulkintos medienos su spygliais (Nr. 3). Bandymų metu buvo tiriamas naudotų smulkintos medienos bandinių dalelių dydžių pasiskirstymas. Nustatyta, kad tik pusė bandinio kiekio yra didesnės frakcijos (didesni nei 10 mm), o likusios smulkios biokuro dalelės yra įvairaus dydžio, tačiau mažesnės nei 10 mm. Toks dalelių pasiskirstymas, ir ypač didelis kiekis smulkios frakcijos, gali turėti įtakos drėgmės išsiskyrimo greičiui. Pirmieji eksperimentiniai tyrimai (3.2–3.5 pav.) atlikti tiekiant skirtingų temperatūrų orą. Temperatūrų pokyčio fiksavimas (pagal 2.5 pav. pateiktą schemą) smulkintos medienos įkrovoje leido suvokti biokuro drėgmės išsiskyrimo metu vykstančius procesus bei džiovinimo agento – pirminio oro, recirkuliacijos dūmų, spinduliavimo temperatūros – įtaką drėgmės išsiskyrimo procesui. Taip pat iš gautų rezultatų galima identifikuoti, kuriose bandinio įkrovos vietose drėgmė pasišalina intensyviausiai, o kuriose pasireiškia stagnacijos procesas.



3.2 pav. Temperatūrų kitimas įvairiuose smulkintos medienos įkrovos aukščiuose, tiekiant 50 °C temperatūros orą (pagal 2.5 pav. pateiktą schemą)

Fiksuojant temperatūros pokyčius įvairiuose smulkintos medienos biokuro įkrovos aukščiuose, nustatyta, kad tiekiant į džiovinimo kamerą 50 °C temperatūros orą, temperatūra kyla labai vangiai, o po 30 minučių aukščiausia temperatūra visoje įkrovoje tesiekė tik 25 °C (3.2 pav.). Padidinus pirminio oro temperatūrą iki 100 °C, stambesnės frakcijos smulkintos medienos su lapais ir smulkintos medienos su žieve biokuro įkrovos aukščiausia temperatūra po 30 minučių taške T1 jau siekė 38 °C (3.3 pav.).

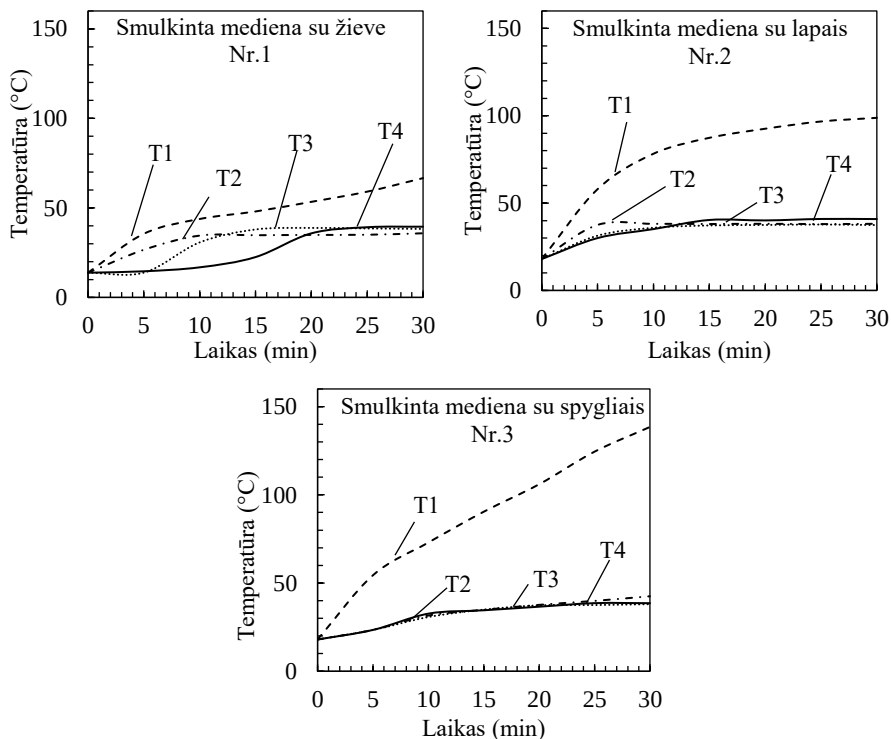


3.3 pav. Temperatūrų kitimas įvairiuose smulkintos medienos biokuro įkrovos aukščiuose, tiekiant 100 °C temperatūros orą (pagal 2.5 pav. pateiktą schemą)

Smulkesnės frakcijos biokuro, t. y. smulkintos medienos su spygliiais džiovinimo metu nustatyta, kad apatiniame sluoksnyje po 10 minučių nuo eksperimento pradžios įkrovos temperatūra taške T1 pasiekia 59 °C, o po 30 minučių šiame įkrovos aukštyje temperatūra padidėja iki 79 °C. Pirminis oras, aptekėdamas drėgną smulkintos medienos biokurą, prisotina drėgmės, kurią perneša į aukštesnius įkrovos sluoksnius. Vėliau tiekiamame pašildytame ore esanti drėgmė kondensuojasi ant aukščiau esančių biokuro dalelių paviršiaus. Dėl pirminio sauso oro įtakos arčiausiai ardymo esančiame įkrovos sluoksnyje drėgmės išsiskyrimas intensyviausias, todėl ir temperatūra šioje vietoje kito sparčiausiai. Stagnacijos taškai, kai nebekinta temperatūra ir biokuras nepraranda drėgmės, buvo smulkintos medienos įkrovos viduryje, kur dėl drėgmės pernešimo ir intensyvios kondensacijos drėgmės išsiskyrimo procesas sustodavo dėl nepakankamai aukštos pirminio oro temperatūros.

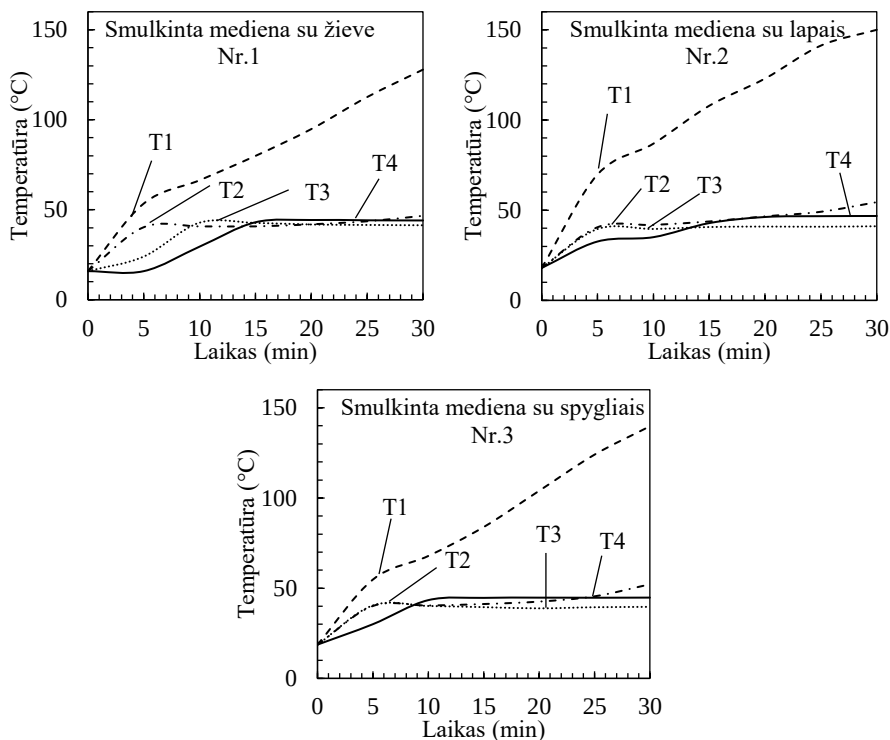
Džiovinant smulkintos medienos biokuro bandinius aukštesnės temperatūros 150 °C (3.4 pav.), 200 °C (3.5 pav.) pirminiu oru, drėgmės išsiskyrimo procesas intensyvėja. Dėl dalelių dydžio ir užsitęsusios kondensacijos stambesnės frakcijos smulkintos medienos įkrovos drėgmės išsiskyrimo procesas vyksta lėčiau, lyginant su smulkesnės frakcijos. Tai rodo gauti rezultatai, kai buvo tiekiamas 200 °C pirminis oras ir po 10 minučių apatiniame įkrovos sluoksnyje taške T1 užfiksuotos tokios temperatūros: smulkintos medienos su žieve bandinyje – 66 °C (po 30 min – 127 °C), smulkintos medienos su lapais bandinyje – 87 °C (po 30 min – 150 °C), smulkintos

medienos su spygliais bandinyje – 68 °C (po 30 min – 139 °C). Aukščiausia temperatūra apatiniame įkrovos sluoksnyje T1 buvo pasiekta džiovinant smulkintą medieną su lapais. Atliekant tyrimus pastebėta, kad toks biokuras turi savybę susispausti ir susisluoksniuoti, todėl dėl padidėjusio sluoksnio pasipriešinimo oras negalėjo lengvai pratekėti į viršuje esančius sluoksnius, o tai lėmė spartesnį drėgmės išsiskyrimą apatiniame sluoksnyje.



3.4 pav. Temperatūrų kitimas įvairiuose smulkintos medienos biokuro įkrovos aukščiuose, tiekiant 150 °C temperatūros orą (pagal 2.5 pav. pateiktą schemą)

Apibendrinus galima teigti, kad, atliekant eksperimentinius tyrimus esant aukštesnėms džiovinimo oro temperatūroms, išryškėjo drėgmės išsiskyrimo intensyvumo skirtumai bei tendencijos skirtinguose įkrovos taškuose. Buvo nustatyta, kad pirma drėgmė išsiskiria iš biokuro sluoksnio, esančio arčiausiai ardyno, tada intensyviai drėgmės netenka arčiausiai džiovinimo kameros šoninių sienelių esantis biokuro sluoksnis ir galiausiai likusioji biokuro įkrovos dalis.

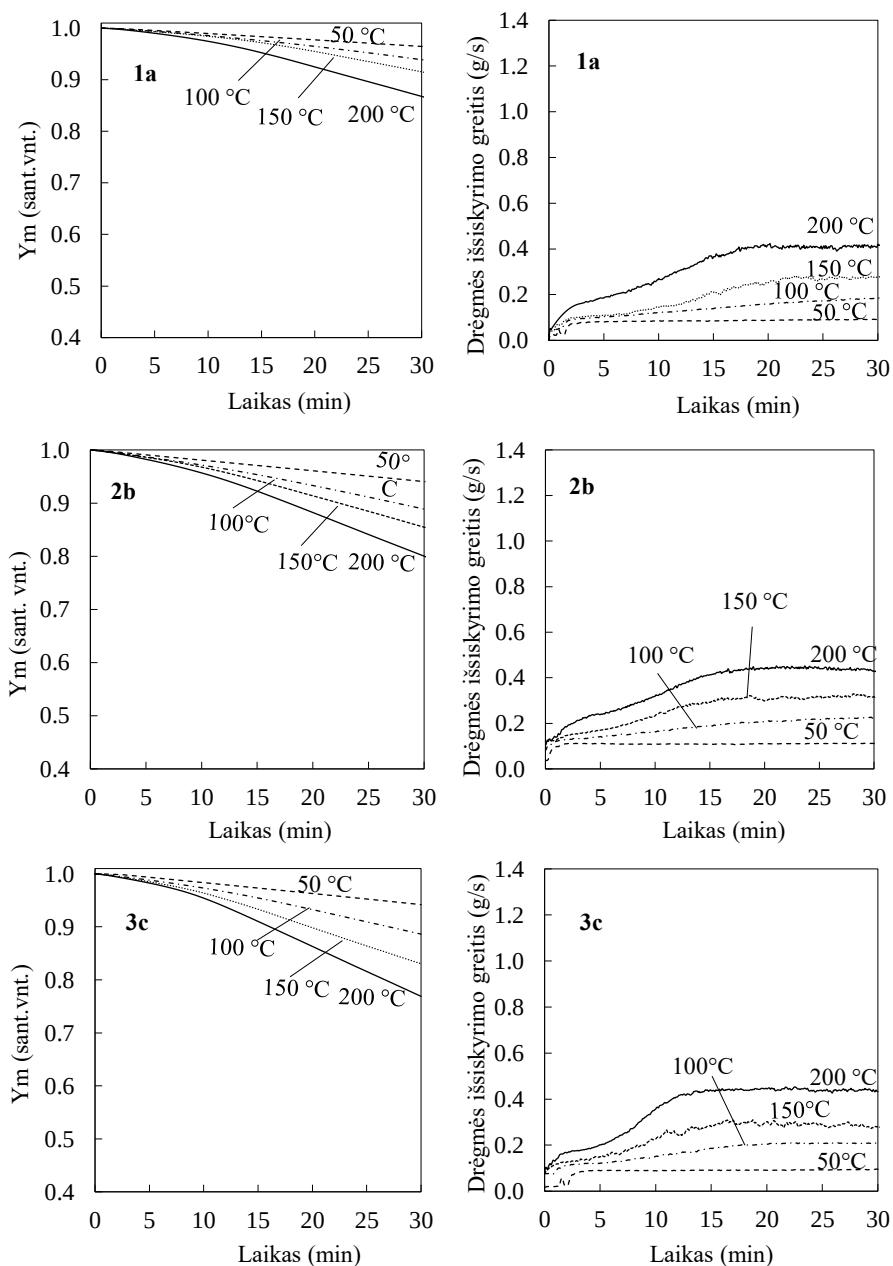


3.5 pav. Temperatūrų kitimas įvairiuose smulkintos medienos biokuro įkrovos aukščiuose tiekiant 200 °C temperatūros orą (pagal 2.5 pav. pateiktą schemą)

3.2.2. Drėgmės kitimas smulkintos medienos biokuro sluoksnyje

Temperatūrinių jutiklių integravimas įvairiuose smulkintos medienos biokuro sluoksniuose gali padėti prognozuoti biokuro drėgmės išsiskyrimo tendenciją ant ardyno, tačiau negali įvertinti tikslaus drėgmės išsiskyrimo intensyvumo. Todėl biokuro bandinių vidutinis drėgmės kiekis bei drėgmės išsiskyrimo greitis eksperimentinių tyrimų metu buvo išskaičiuojami įvertinus išeinančių dūmų drėgmę 3.6 pav.

Džiovinant biokuro bandinius skirtingų temperatūrų (50–200 °C) džiovinimo oru, nustatyta, kad pirmosiomis eksperimento minutėmis drėgmės netenkama sparčiausiai. Po 2 minučių nuo eksperimento pradžios drėgmės išsiskyrimo greitis sumažėja, kadangi džiovinimo oras pasiekia įsisotinimo tašką. Tiekiant pro ardyno apačią 50 °C temperatūros džiovinimo orą, drėgmės išsiskyrimo greitis visų eksperimentinių tyrimų metu buvo pastovus ir siekė 0,1 g/s, todėl po 10 minučių nuo eksperimento pradžios drėgmės pokytis bandiniuose tesiekė 2 %, o po 30 minučių nesiekė 6 %.



3.6 pav. Bandinių drėgmės kiekio (Y_m) ir drėgmės išsiskyrimo greičio kitimas džiovinant 50–200 °C temperatūros oru (a) smulkintą medieną su žieve Nr. 1, (b) smulkintą medieną su lapais Nr. 2, (c) smulkintą medieną su spygliais Nr. 3

Džiovinant biokuro bandinius 100 °C temperatūros oru, drėgmės išsiskyrimo greitis visą tyrimo laiką (apie 30 min) didėjo ir net tyrimo pabaigoje nepasiekė pastovios reikšmės. Šio eksperimento metu džiovinant smulkesnės frakcijos biokurą

(Nr. 2 ir Nr. 3) pašildytu oru po 30 minučių drėgmės pokytis visoje įkrovoje siekė 12 %. Džiovinant stambesnės frakcijos (Nr. 1) biokurą drėgmės pokytis eksperimentui pasibaigus buvo tik 6 %. Padidinus džiovinimo oro temperatūrą iki 150 °C, per 30 minučių stambesnės frakcijos biokuro bandinyje (Nr. 1) drėgmės pokytis padidėjo iki 8,5 %, o džiovinant daugiau smulkių dalelių turintį biokuro bandinį (Nr. 2, Nr. 3) drėgmės pokytis atitinkamai buvo 17÷15 %. Veikiant biokuro bandinius aukštesnės temperatūros (150 °C ar 200 °C) džiovinimo oru, buvo pastebėtas drėgmės išsiskyrimo greičio stabilizavimasis. Drėgmės išsiskyrimo intensyvumo stabilizavimas pasiekiamas peršilus visam biokuro bandiniui, t. y., kai temperatūra įvairiuose įkrovos aukščiuose (T2, T3, T4) įgauna tas pačias vertes.

Džiovinant bandinius (Nr.1, Nr. 2, Nr. 3) 150 °C džiovinimo oru, drėgmės kitimas stabilizuojasi, atitinkamai apie 22 min, 15 min ir 14 min, ir yra pasiekiamas 0,3 g/s drėgmės išsiskyrimo greitis. Džiovinant bandinius (Nr. 1, Nr. 2, Nr. 3) 200 °C temperatūros oru, drėgmės kitimas stabilizuojasi anksčiau, atitinkamai po 18 min, 15 min ir 12 min, ir pasiekia 0,4 g/s drėgmės išsiskyrimo greitį. Padidinus džiovinimo oro temperatūrą iki 200 °C po 30 min drėgmės pokytis biokuro bandinyje Nr. 1 buvo apie 13,5 %, tuo tarpu bandinyje Nr. 2 – 20 %, o bandinyje Nr. 3 – 23 %.

Atlikus pirminių eksperimentinių tyrimų su pašildytu sausu džiovinimo oru rezultatų analizę, pastebėta, kad tik tiekiant žemos (50–100 °C) temperatūros orą, itin drėgno (60 % pagal masę) biokuro drėgmės išsiskyrimo procesas pakuroje būtų nepakankamas, t. y. biokuro drėgmė nepasiektų 30 % (pagal masę), kas sudarytų sąlygas savaiminiam liepsnos plitimui. Dėl šios priežasties, siekiant efektyviai ir greitai sudeginti biokurą ant ardyno, yra būtinos papildomos drėgmės išsiskyrimo intensyvinimo priemonės.

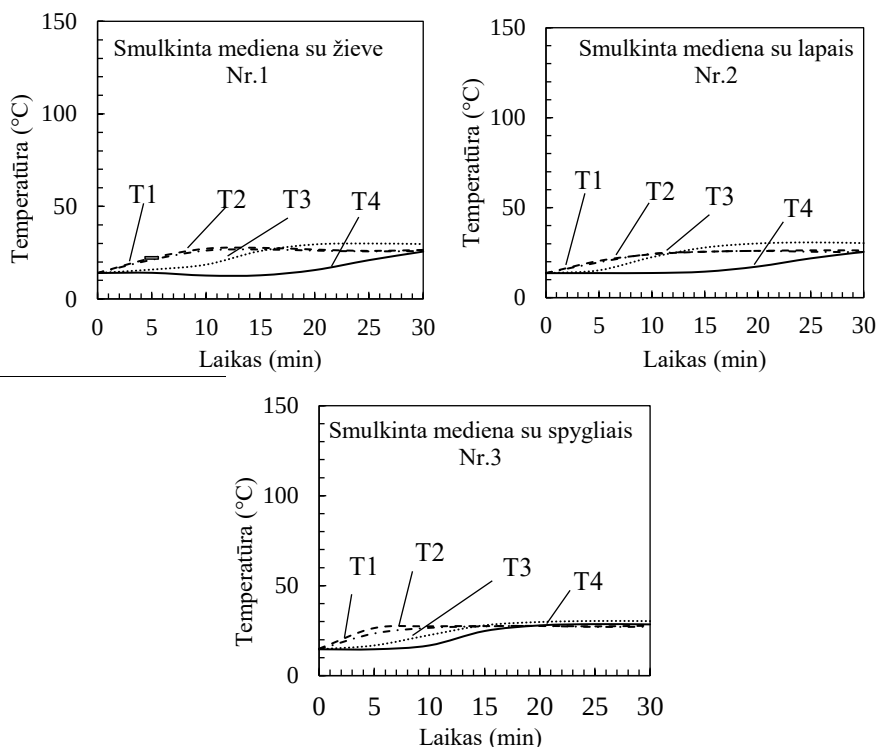
3.3. Recirkuliacijos dūmų įtaka stacionaraus smulkintos medienos biokuro sluoksnio drėgmės išsiskyrimui

3.3.1. Temperatūros pasiskirstymas smulkintos medienos biokuro sluoksnyje

Siekiant atkurti kuo realesnes darbo sąlygas ir atkartoti procesus, vykstančius pakuroje, šiam tyrimui atlikti pasirinktas oro ir vandens garų mišinys. Yra žinoma, kad standartiniuose kietojo kuro deginimo įrenginiuose, siekiant sumažinti NO_x emisijas, kaip vienas iš jų mažinimo būdų yra naudojama išmetamų dūmų recirkuliacija. Dūmai dažnu atveju tiekiami po ardynu siekiant sumažinti biokuro sluoksnio degimo temperatūrą ir tuo pačiu NO_x formavimąsi. Dėl šios priežasties atlikti papildomi eksperimentiniai bandymai siekiant imituoti išmetamų recirkuliacijos dūmų gražinimą į pakuros džiovinimo zoną pro ardyno apačią. Tyrimai parodė, kad bandinių drėgmės išsiskyrimo tendencija buvo labai panaši kaip ir bandinius veikiant tik su sausu oru, tačiau temperatūros pokyčiai smulkintos medienos biokuro įkrovos sluoksniuose buvo pastebėti jau anksčiau. Sparčiausiai peršilo apatinis įkrovos sluoksnis, tada pasienio sluoksnis ir galiausiai likęs biokuras.

Tiekiant į džiovinimo kameros apačią 50 °C temperatūros oro ir vandens garų mišinį (imituojant recirkuliacijos dūmus) per 30 min biokuro bandiniai (Nr. 1, Nr. 2, Nr. 3) įšilo 5–7 °C greičiau ir pasiekė 30 °C (3.7 pav.), lyginant su tyrimais, atliktais tik su sausu džiovinimo oru (3.2 pav.). Tokio rezultato galima buvo tikėtis, kadangi šilumos atidavimo koeficientas kondensuojantis vandens garai yra ženkliai didesnis

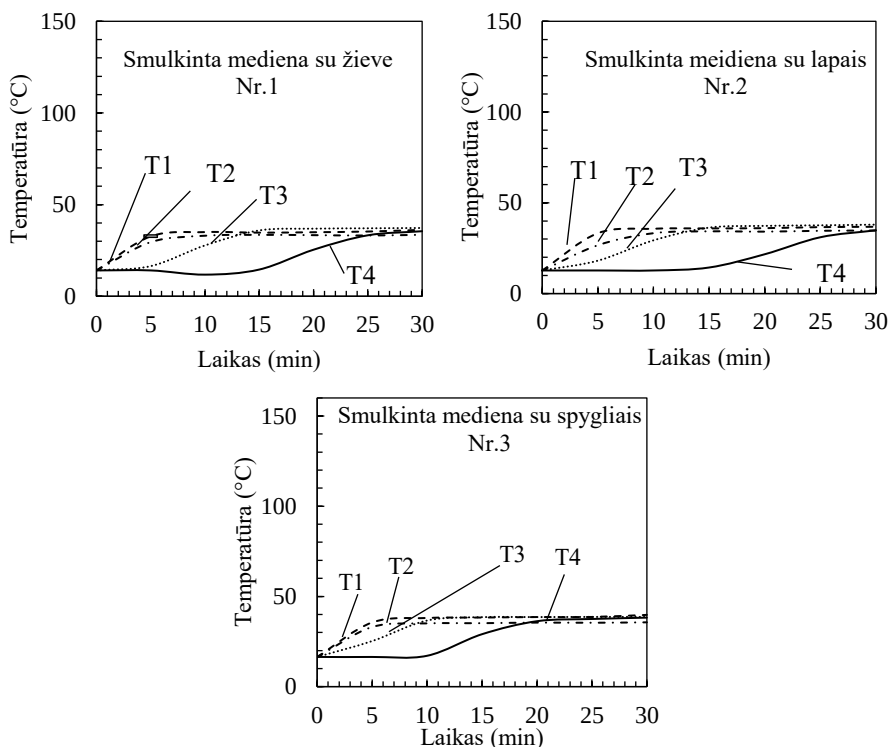
lyginant su oru ir šilumos mainai vyksta intensyviau. Savo šilumą biokuroi atidavęs besikondensuojantis vandens garas duoda tik pirminį įkrovos pašildymo efektą. Toliau sluoksnio džiūvimas lėtėja dėl įneštos papildomos drėgmės. Atlikus gautų rezultatų analizę ir palyginimą, taip pat buvo pastebėta, jog bandinių džiovinimui naudojant tik sausą orą (3.2 pav.), pradinis pašildymo efektas nebuvo toks ryškus, kaip naudojant oro ir vandens garų mišinį, tačiau tolesnis drėgmės išsiskyrimo procesas naudojant sausą orą buvo ženkliai spartesnis.



3.7 pav. Temperatūrų kitimas įvairiuose smulkintos medienos biokuro įkrovos aukščiuose, tiekiant 50 °C temperatūros orą ir vandens garų mišinį (pagal 2.5 pav. pateiktą schemą)

Analogiška temperatūros kitimo tendencija nustatyta džiovinimui naudojant 100 °C oro ir vandens garų mišinį, tačiau stebimas ryškesnis proceso sulėtėjimo efektas (3.8 pav. T1 ir T2 kitimas). Veikiant bandinius (Nr. 1, Nr. 2, Nr. 3) 100 °C temperatūros oro ir vandens garų mišiniu, nustatyta, kad net smulkiausios frakcijos biokuro įkrovos apatinio sluoksnio temperatūra T1 pasibaigus eksperimentui buvo tik 38 °C, kai tuo tarpu džiovinant tik sausu oru temperatūra taške T1 pakilo iki 78 °C. Analizuojant rezultatus, gautus atlikus bandymus su skirtingais biokuro bandiniais, matyti, kad skirtumas tik toks, kad smulkesnės frakcijos biokuro įkrova degimo kameroje peršildavo per trumpesnę laiką. Pavyzdžiui, džiovinat smulkintos medienos skiedras su žieve (Nr. 1) ir smulkintos medienos skiedras su lapais (Nr. 2), 38 °C temperatūra visuose įkrovos aukščiuose yra pasiekama po 25 minučių, o džiovinant smulkintos medienos skiedras su spygliais (Nr. 3) – po 15 minučių.

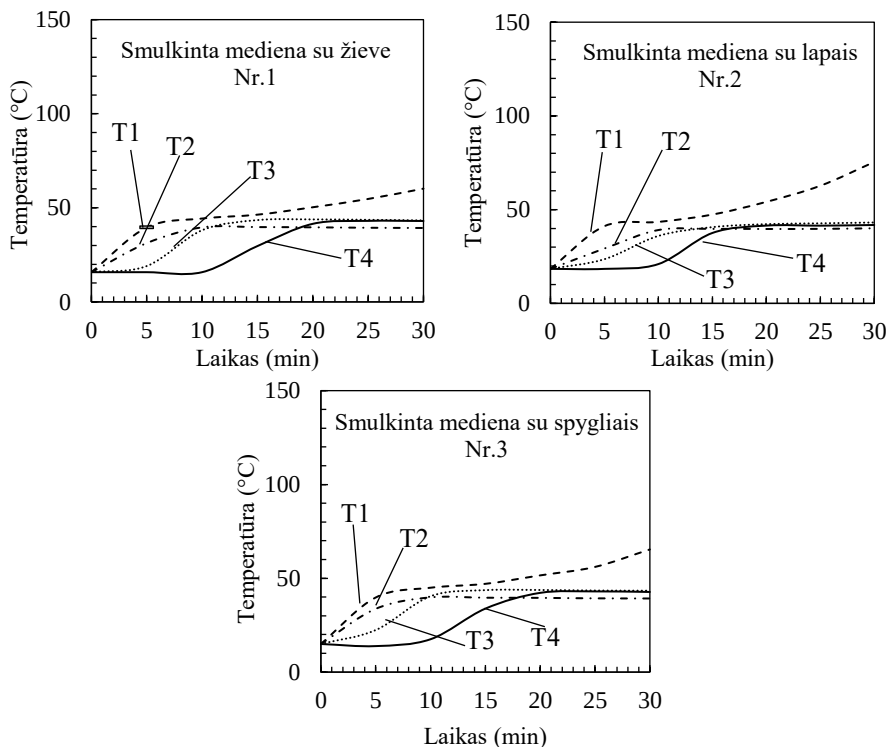
Gauti rezultatai rodo, kad pagrindinis skirtumas, dėl ko skiriasi drėgmės išsiskyrimo procesas naudojant žemos temperatūros (50 °C bei 100 °C) orą arba oro ir vandens garo mišinį, yra toks, kad oro ir vandens garo mišinys intensyvina drėgno biokuro sluoksnio šilimą tik pradžioje, t. y. iki 5 min. Tačiau dėl įvykusios kondensacijos tolesniuose įkrovo sluoksniuose temperatūros kilimas sulėtėja ir drėgmės garavimas vyksta sunkiau visoje biokuro įkrovoje.



3.8 pav. Temperatūrų kitimas įvairiuose smulkintos medienos biokuro įkrovo aukščiuose tiekiant 100 °C temperatūros orą ir vandens garų mišinį (pagal 2.5 pav. pateiktą schemą)

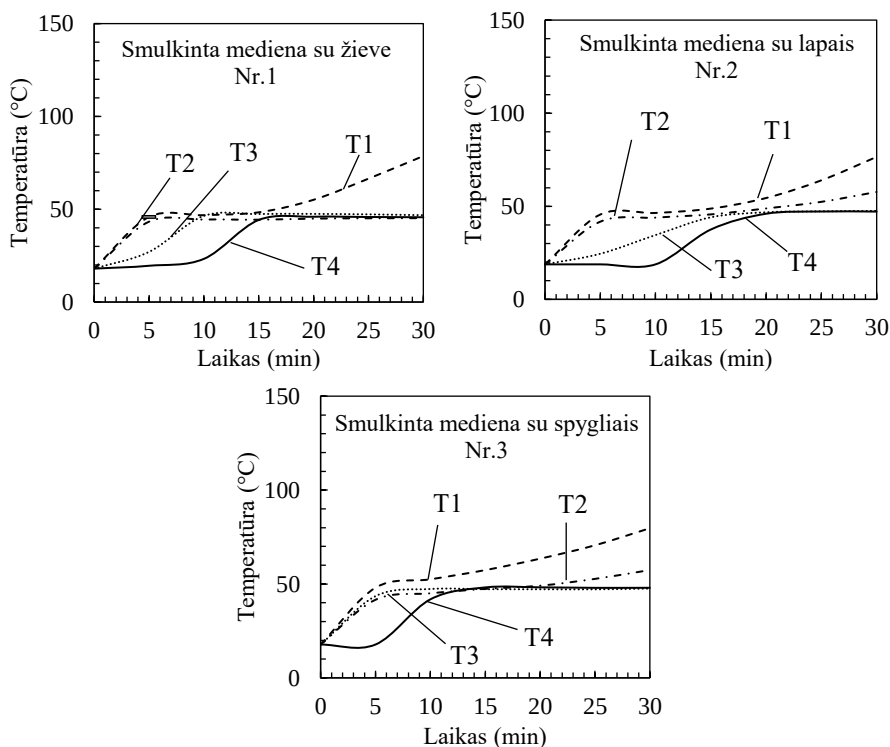
Padidinus oro ir vandens garų mišinio temperatūrą iki 150 °C, anksčiau aptartas efektas tampa ryškesnis, pvz., proceso pradžioje temperatūra T1 didėja tik iki 5 min, vėliau stabilizuojasi ir tuomet apie 15 min nuo eksperimento pradžios apatinio sluoksnio temperatūra pradeda kilti (3.9 pav.). Tai būdinga visiems tirtiems bandiniams. Toks temperatūros stabilizavimasis gali būti susijęs su pradinės drėgmės kondensacija, kai atneštas garas susikondensuoja, o jam išgarinti reikia papildomai laiko ir papildomos šilumos. Kai tik drėgmė biokure sumažėja, prasideda temperatūros kilimas. Bandinių sluoksnių perkaitinimo greičio kitimas yra susijęs ir su džiovinimo agentų fizikinėmis charakteristikomis, kur yra žinoma, kad vandens garo savitoji šiluma c_p yra 2 kJ/kg K (vandens c_p – 4,2 kJ/kg K), o oro savitoji šiluma c_p – 1 kJ/kg K, o tai lemia pernešamo energijos kiekio skirtumą bei jo poreikį vandeniui išgarinti. Yra žinoma, kad vandenį paversti garu reikia visų pirma jį

pašildyti iki garavimo temperatūros, vėliau išgarinti, kai vandens garavimo šiluma c_{p2} lygi 2256 kJ/kg.



3.9 pav. Temperatūrų kitimas įvairiuose smulkintos medienos biokuro įkrovos aukščiuose tiekiant 150 °C temperatūros orą ir vandens garų mišinį (pagal 2.5 pav. pateiktą schemą)

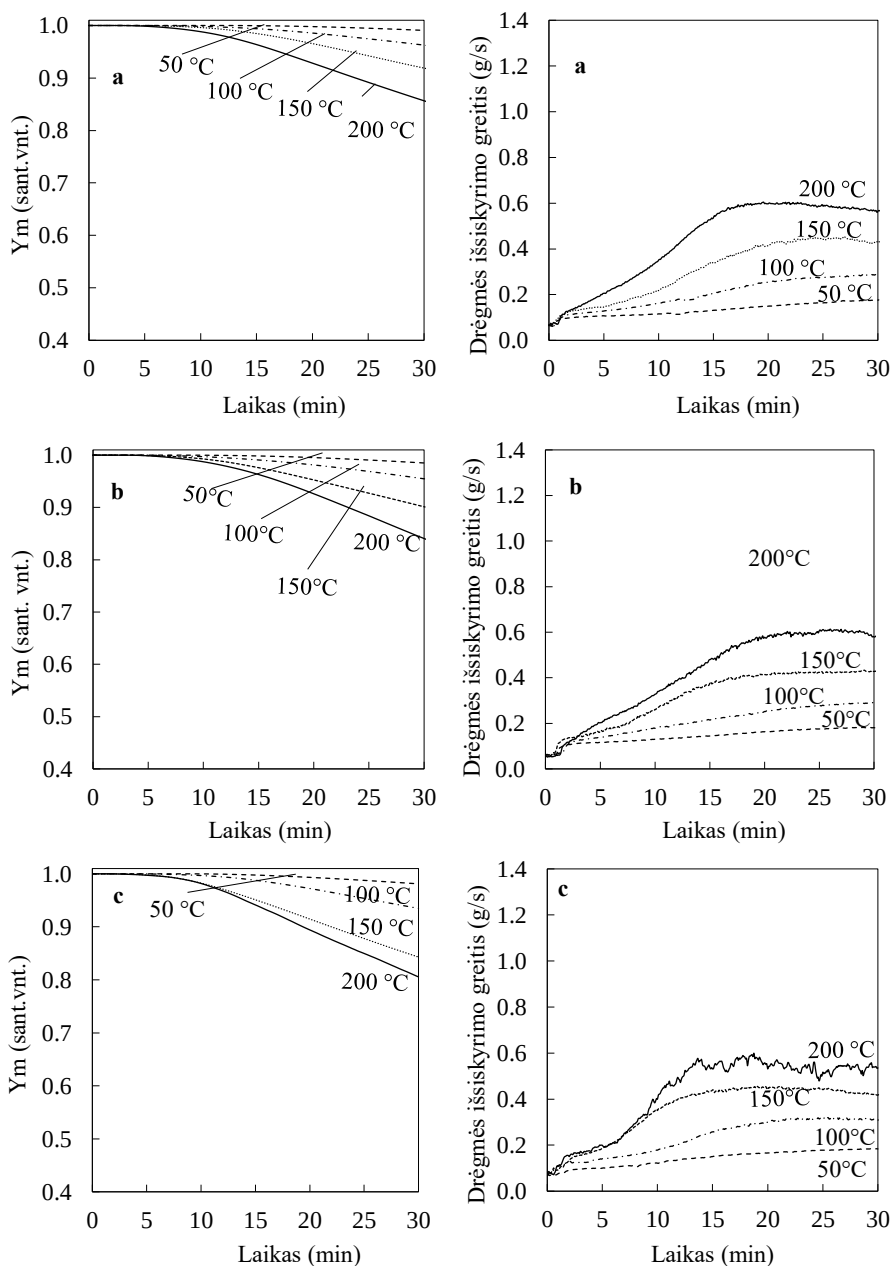
Padidinus oro ir vandens garų mišinio, imituojančio išmetamuosius recirkuliacijos dūmus, temperatūrą iki 200 °C ir juo veikiant smulkesnės frakcijos biokuro bandinius, kurių vidutinis dalelės charakteringas ilgis nedidesnis nei 9 mm, nustatyta, kad įkaitus apatiniam bandinių sluoksniui iki 70 °C (25 min nuo eksperimento pradžios) prasideda intensyvus šilumos perdavimas biokuro sluoksniui, esančiam prie džiovinimo kameros sienelių (3.10 pav. T2 kitimas). Džiovinant tą pačią savybių bei frakcijos biokuro bandinius su sausu 200 °C temperatūros oru, buvo pastebėta, jog, apatiniame sluoksnyje pasiekus 140 °C ir didesnę temperatūrą, prie sienelių esančio biokuro sluoksniu dalelių drėgmės išsiskyrimas ir intensyvesnė dalelių įšilimo pradžia (3.5 pav.). Tokį efektą galima paaiškinti tuo, kad garo šiluminė talpa yra du kartus didesnė nei oro, tai ir pernešamas šilumos kiekis tame pačiame sraute yra du kartus didesnis, dėl to šilumos atidavimo koeficientas yra apie 20 kartų didesnis nei sauso oro. Atliekant džiovinimo eksperimentus su pašildytu oru matyti, kad didžioji dalis šiluminės energijos eikvojama apatinio sluoksniu drėgmei išgarinti, todėl likusioje biokuro įkrovos dalyje temperatūra didėja ne taip sparčiai kaip veikiant bandinius su oro ir vandens garų mišiniu.



3.10 pav. Temperatūrų kitimas įvairiuose smulkintos medienos biokuro įkrovos aukščiuose tiekiant 200 °C temperatūros orą ir vandens garų mišinį (pagal 2.5 pav. pateiktą schemą)

3.3.2. Drėgmės kitimas smulkintos medienos biokuro sluoksnyje

Atliekant eksperimentinius tyrimus su oro ir vandens garų mišiniu (3.11 pav.), imituojuojant recirkuliacijos dūmų patekimą į pakurą pro ardyno apačią, stacionarus biokuro sluoksnis buvo veikiamas 17 g/m³ drėgmės turinčiu oru. Visų eksperimentinių tyrimų metu buvo matuojama įeinančių ir išeinančių dūmų drėgmė. Šie matavimai parodė, kad pirmosiomis tyrimų minutėmis įeinančių dūmų drėgmės kiekis buvo didesnis už išeinančių dūmų drėgmę. Apdorojus gautus rezultatus ir įvertinus biokuro drėgmės išsiskyrimo greitį, nustatyta, kad drėgmė, esanti džiovinimo mišinyje, ne tik paspartina kondensacijos procesą ant šaltų biokuro dalelių paviršių, bet ir įneša į džiovimo kamerą papildomos drėgmės. Nepaisant drėgmės džiovinimo procese didėjimo, buvo pastebėta, kad tuo metu biokuro sluoksniuose temperatūra taip pat kilo, o tai patvirtina vykstančią kondensaciją, kurios metu išsiskyrusi šiluma yra sunaudojama biokurui ir jame esančiam vandeniui šildyti. Tačiau intensyvesnis drėgmės išsiskyrimo procesas tuo metu nevyksta, todėl tas periodas dar vadinamas stagnacijos periodu [(Bauer et al. 2010)]. Bandymais nustatyta, kad šio, stagnacijos periodo, trukmė priklauso ne tik nuo džiovinimo mišinio temperatūros, bet ir nuo biokuro frakcijos.



3.11 pav. Bandinių drėgmės kiekio Y_m ir drėgmės išsiskyrimo greičio kitimas džiovinant 50–200 °C temperatūros oro ir vandens garų mišiniu (a) smulkintą medieną su žieve Nr. 1, (b) smulkintą medieną su lapais Nr. 2, (c) smulkintą medieną su spygliais Nr. 3

Džiovinant stambios frakcijos biokūrą, tokį kaip smulkintos medienos skiedras su žieve (Nr. 1), 50 °C temperatūros oro ir vandens garų mišiniu, stagnacijos periodas nuo eksperimento pradžios trunka daugiau nei 12 minučių (3.11 a pav.). Tai patvirtina ir temperatūrų kreivės (3.7 pav.), kai po 12 minučių pradeda didėti įkrovos

temperatūra T3. Veikiant oro ir vandens garų mišiniu tirtus smulkesnės frakcijos biokuro bandinius, šis periodas sutrumpėjo iki 8 minučių (3.11 b, c pav.). Atlikti tyrimai rodo, kad į realios pakuros džiovinimo zoną tiekiant drėgną biokurą ir jį veikiant drėgnais, žemos iki 50 °C temperatūros recirkuliacijos dėmiais, biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumas bus nepakankamas ir po rekomenduojamų 10 minučių džiovinimo drėgmės kiekis bandiniuose liks nepakitęs. Dėl to didžiojoje pakuros degimo zonoje vyks biokuro džiūvimas, o ne degimas.

Padidinus džiovinimo oro ir vandens garų (recirkuliacijos dėmų) temperatūrą iki 100 °C, smulkintos medienos su žieve bandinio (Nr. 1) įkrovos stagnacijos periodas sutrumpėjo iki 4 minučių (kai 150 °C – 3 min), o smulkintos medienos su lapais ir smulkintos medienos su spygliais iki 2÷3 minutės (kai 150 °C – 2,5 min) (3.11 pav.). Išvengti stagnacijos periodo nepavyko net ir padidinus oro-garo mišinio temperatūrą iki 200 °C. Su 200 °C oro ir vandens garų mišiniu džiovinant smulkiausio (Nr. 3) biokuro bandinį, stagnacijos periodas truko 1,5 minutės, džiovinant smulkintą medieną su žieve – 2,5 minutės (3.11 a, c pav.).

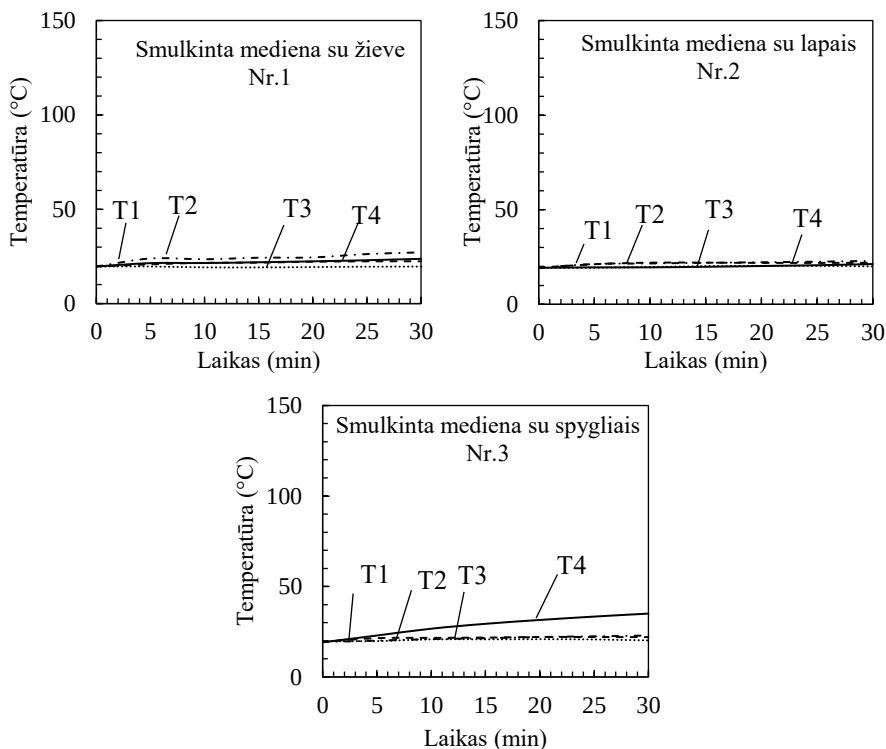
10 minučių džiovinant biokuro bandinius su 200 °C oro ir vandens garų mišiniu, nustatyta, kad didžiausias bandinių drėgmės išsiskyrimo greitis tesiekia 0,4 g/s, o prailginus kuro išbuvimo laiką ant ardyno iki 30 minučių drėgmės išsiskyrimo greitis padidėja iki 0,53 g/s. Įvertinus drėgmės kiekio sumažėjimą bandiniuose, pastebėta, kad po 30 minučių bandinių džiovinimo su žemos iki 100 °C temperatūros džiovinimo oro ir vandens garų mišiniu, drėgmės pokytis smulkintos medienos bandiniuose buvo mažiau kaip 7 %. Pakėlus oro ir vandens garų mišinio temperatūrą iki 200 °C, drėgmės pokytis stambesnės frakcijos smulkintos medienos bandinyje gali padidėti iki 14,5 %, o smulkintos medienos su spygliais (3.11 a, c pav.) – iki 20 %.

3.4. Spinduliavimo bei pirminio oro įtaka stacionaraus smulkintos medienos biokuro sluoksnio drėgmės išsiskyrimui

3.4.1. Temperatūros pasiskirstymas smulkintos medienos biokuro sluoksnyje

Iš atliktų eksperimentinių tyrimų, imituojant pirminio oro ir recirkuliacijos produktų įvedimą pro ardyno apačią, buvo vertinama tik konvekcijos būdu perduodama šiluma. Realioje biokuro pakuroje, degant biokurui ir esant įkaitusiems paviršiams, yra sukuriama sąlyga šilumai perduoti spinduliavimo būdu, todėl buvo atlikti papildomi eksperimentiniai tyrimai imituojant spinduliavimo įtaką nuo įkaitusių pakuros paviršių. Pakuros paviršių spinduliavimo imitacijai sumontuoti infraraudonųjų spindulių (IR) šildytuvai, kurių spinduliavimo galia, tenkanti ardyno ploto vienetui, atitinka realiose pakurose esančiam spinduliavimo intensyvumui.

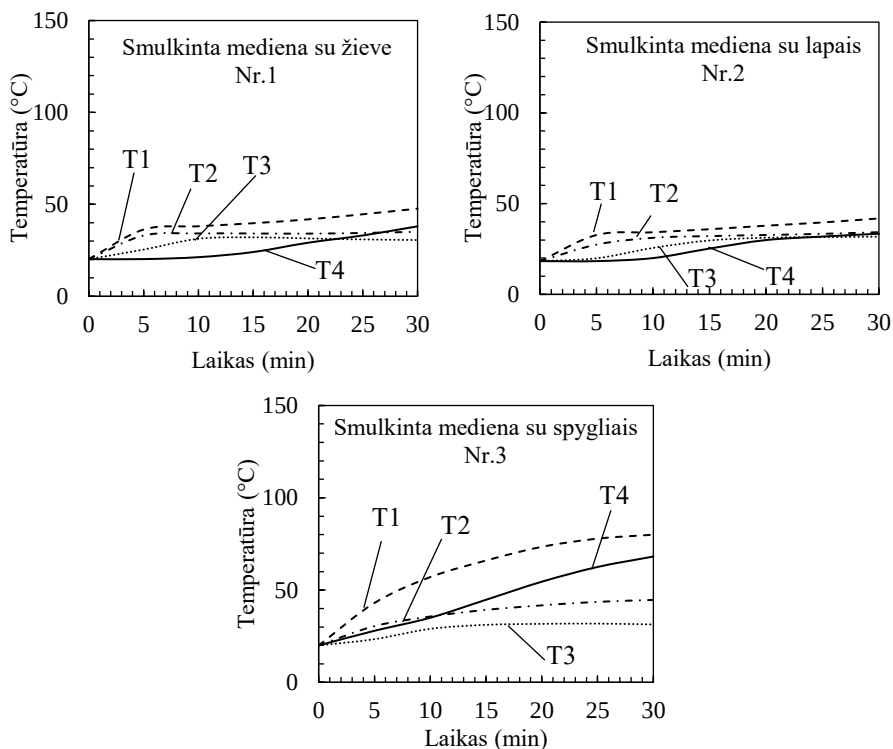
Buvo pastebėta, jog recirkuliacijos dėmai lėtina drėgmės išsiskyrimo procesą, todėl eksperimentams su IR šviestuvais buvo pasirinktas džiovinimo agentas – sausas oras. Džiovinant biokuro bandinius su skirtingų temperatūrų sausu oru ir spinduliuojant 50 kW/m² šiluminę energiją į įkrovos paviršių, buvo stebėti temperatūrų pokyčiai įvairiuose įkrovos aukščiuose (3.12 pav.).



3.12 pav. Temperatūrų kitimas įvairiuose smulkintos medienos biokuro įkrovos aukščiuose tiekiant 50 °C temperatūros orą ir veikiant spinduliavimui (pagal 2.5 pav. pateiktą schemą)

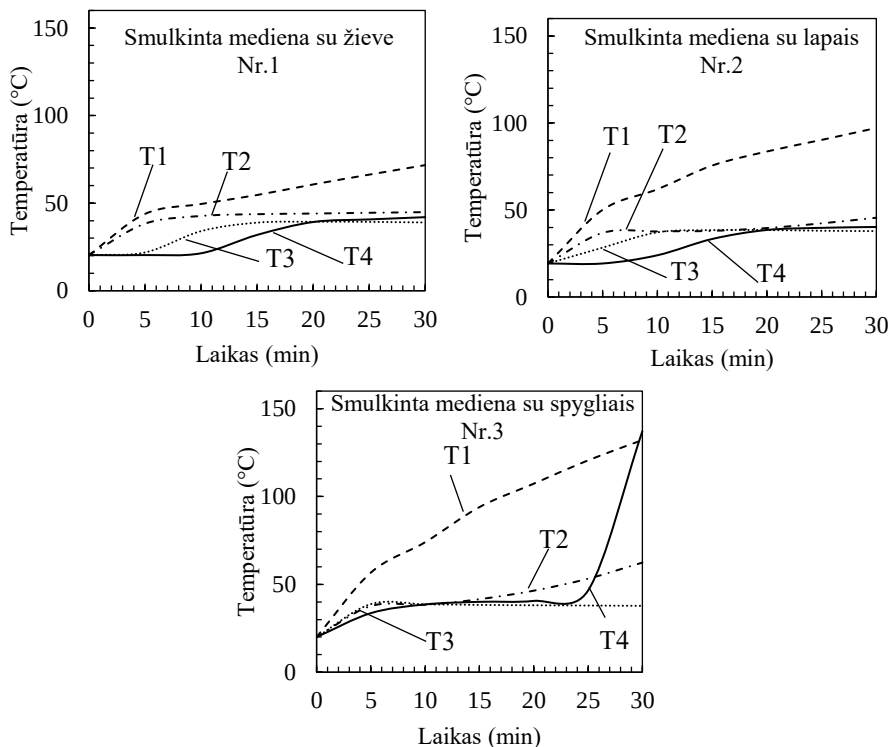
Išanalizavus bandinių temperatūrų pokyčius, nustatyta, kad spinduliavimas nuo įkaitusių vidinių pakuros paviršių skatina tik biokuro įkrovos viršuje esančių dalelių drėgmės išsiskyrimą. Tai patvirtina viršutiniame stacionarios įkrovos sluoksnyje (apie 1 cm nuo paviršiaus) įmontuotas temperatūros daviklis T4, kuris pirmosiomis eksperimentinių tyrimų minutėmis staigaus temperatūros kilimo nefiksavo. Tai pat nustatyta, kad biokuro bandinių įkrovos temperatūrų kitimo tendencija labai panaši kaip ir džiovinant biokurą tik su pašildytu oru.

Džiovinant smulkintos medienos su žieve (Nr. 1) ir smulkintos medienos su lapais (Nr. 2) bandinius spinduliavimu bei 100 °C temperatūros oru, jutiklio T4 temperatūra, integruoto aukščiausiam įkrovos sluoksnyje, buvo tokia pati, kaip ir džiovinant tik su pašildytu oru (apie 38 °C). Tačiau džiovinant smulkiausios frakcijos (Nr. 3) biokurą temperatūros jutiklis T4 fiksavo aukštesnę sluoksnio temperatūrą, kuri buvo 68 °C (3.13 pav.).



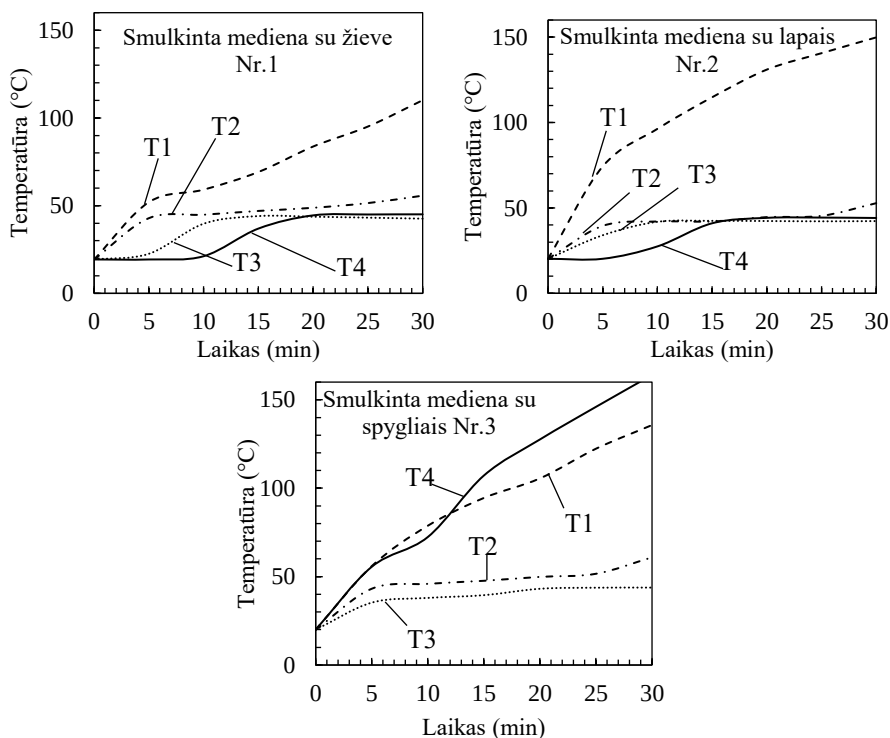
3.13 pav. Temperatūrų kitimas įvairiuose smulkintos medienos biokuro įkrovos aukščiuose tiekiant 100 °C temperatūros orą ir veikiant spinduliavimui (pagal 2.5 pav. pateiktą schemą)

Yra žinoma, kad džiovinant smulkią, daug eterinių aliejų turinčią biomasę lakiųjų medžiagų išsiskyrimas pasireiškia esant žemesnėms temperatūroms, o tai gali padidinti užsidegimo galimybę (Johansson, Rasmuson 2017). Tokie atsitiktiniai paviršinio sluoksnio užsidegimai buvo pastebėti ir eksperimentų metu, džiovinant smulkios frakcijos biokurą (Nr. 3), kuriame gausu spyglių (3.14 ir 3.15 pav.). Šį efektą galima stebėti remiantis temperatūros T4 kitimu, kuris reprezentuoja vykstančius staigius pokyčius veikiant paviršių infraraudonųjų spindulių šildytuvais. Kadangi biokuro bandiniai nėra homogeniniai, be to, dalelių pasiskirstymas kiekvienu atveju skiriasi, todėl paviršinio sluoksnio užsidegimai įvykdavo atsitiktinai ir to prognozuoti neįmanoma. Nors infraraudonųjų spindulių pernešamas šilumos kiekis ženkliai efektyvina drėgmės išsiskyrimo procesą biokuro įkrovos paviršiuje, tačiau užsidegusios dalelės negeba perduoti šilumos žemiau esantiems biokuro sluoksniams.



3.14 pav. Temperatūrų kitimas įvairiuose smulkintos medienos biokuro įkrovos aukščiuose tiekiant 150 °C temperatūros orą ir veikiant spinduliavimui (pagal 2.5 pav. pateiktą schemą)

Be to, buvo fiksuojamas temperatūros T2 pokytis (3.14 ir 3.15 pav.) ties kameros sluoksniu, esančiu arčiausiai sienos, kai, iš viršaus veikiant infraraudonųjų spindulių šildytuvams, kuro sluoksnio temperatūra buvo apie 10 °C didesnė, nepriklausomai nuo pirminio oro temperatūros. Toks temperatūros T2 padidėjimas gali būti paaiškinamas dėl džiovinimo kameros šoninių sienelių įkaitimo nuo IR šildytuvų, skirtų spinduliavimui imituoti. Nors šoninės sienos ir buvo izoliuotos, kad neperduotų šilumos biokurui, tačiau izoliacija, matyt, nebuvo pakankama arba nepilnai užtikrino šilumos varžos nuo įkaitusių kameros šoninių sienų.

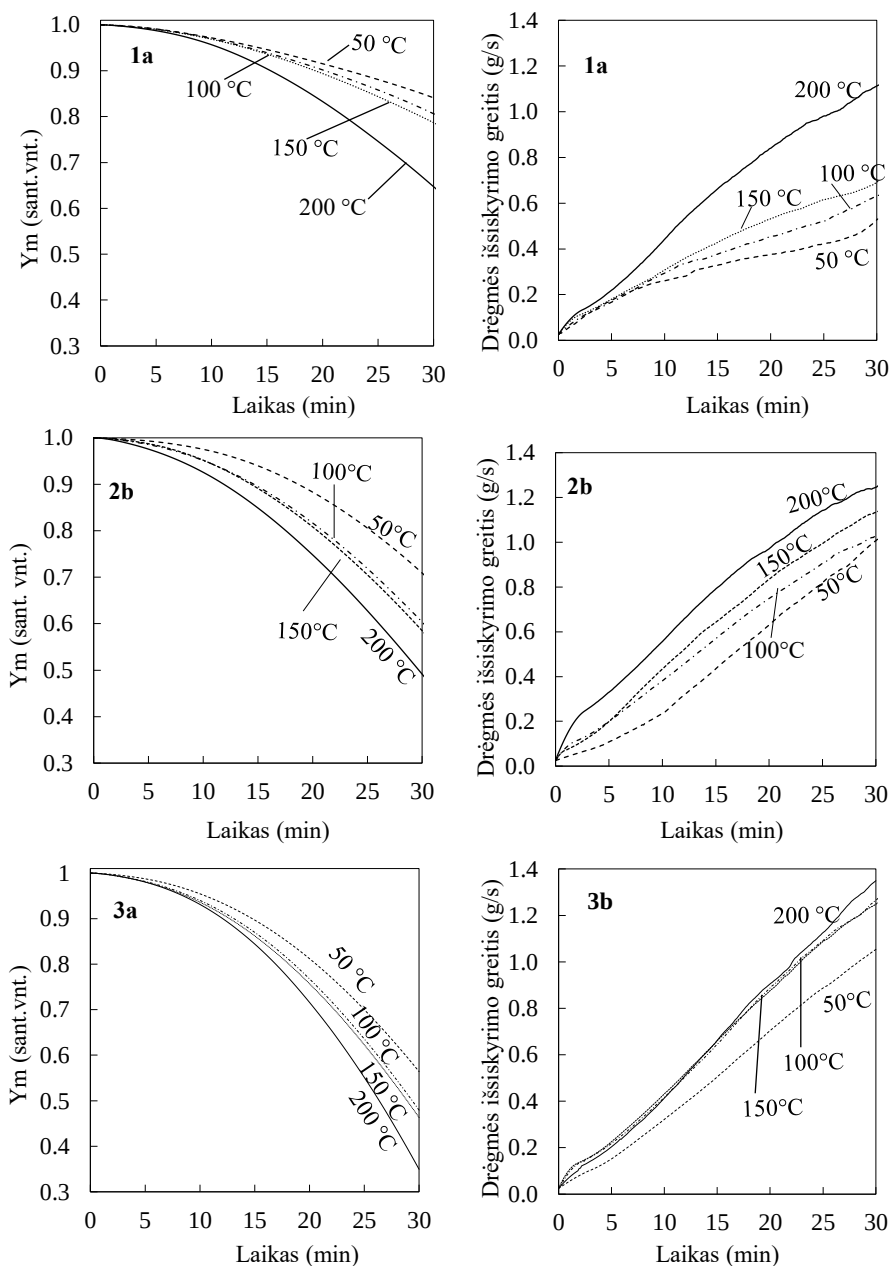


3.15 pav. Temperatūrų kitimas įvairiuose smulkintos medienos biokuro įkrovos aukščiuose tiekiant 200 °C temperatūros orą ir veikiant spinduliavimui (pagal 2.5 pav. pateiktą schemą)

3.4.2. Drėgmės kitimas smulkintos medienos biokuro sluoksnyje

Nepaisant fakto, kad temperatūros T4 pokytis biokuro įkrovos viršuje stebimas tik tiriant Nr. 3 bandinį, tačiau nustatyta, kad dėl spinduliavimo įtakos didžioji dalis drėgmės visgi išsiskyrė iš bandinių paviršinio sluoksnio (3.16 pav.).

Iš 3.16 pav. pateiktų normalizuotos drėgmės kiekio bandinyje kreivių kitimo pobūdžio matyti, kad smulkintos medienos su žieve (Nr. 1), su lapais (Nr. 2) ir su spygliais (Nr. 3) bandiniai intensyviai drėgmės netenka nuo pat eksperimentinio tyrimo pradžios. Be to, ženkliai išryškėja drėgmės pokytis bandinyje priklausomai nuo kuro granulometrijos. Džiovinant stambiausios frakcijos biokurą (3.16 a pav.) stebime pirminio oro įtaką, kuri didėja didinant jo temperatūrą. Džiovinant smulkintą medieną su žieve Nr. 1, drėgmės pokytis bandinyje po 10 minučių siekia 4,5 % ir priklausomybė nuo iš įkrovos apačios paduodamo oro yra minimali, t. y. 1 %. Prailginus bandinio išbuvimo ant ardymo laiką iki 30 minučių, buvo stebėta ir pirminio oro temperatūros įtaka biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumui. Džiovinant biokuro bandinį (Nr. 1) 50 °C temperatūros pirminiu oru ir spinduliuojant šiluminę energiją iš viršaus, po 30 minučių drėgmės pokytis bandinyje buvo 16 %, o padidinus pirminio oro temperatūrą iki 200 °C – net 36,3 %. Išanalizavus gautus rezultatus tai pat buvo pastebėta, kad padidinus pirminio oro temperatūrą nuo 50 °C iki 200 °C, vidutinis drėgmės išsiskyrimo greitis šių tyrimų metu padidėjo 2 kartus – nuo 0,3065 iki 0,6210 g/s.



3.16 pav. Bandinių drėgmės kiekio Y_m ir drėgmės išsiskyrimo greičio kitimas džiovinant su 50–200 °C temperatūros oru ir veikiant įkrovą spinduliavimu: (a) smulkintą medieną su žieve Nr. 1, (b) smulkintą medieną su lapais Nr. 2, (c) smulkintą medieną su spygliais Nr. 3

Džiovinant visų frakcijų biokuro bandinius su sausu oru ir spinduliuojant šiluminę energiją virš įkrovos, buvo nustatyta, kad, tiekiant 100 °C ir 150 °C temperatūrų džiovintu pirminį orą, drėgmės pokytis bandiniuose po 30 minučių beveik nesiskyrė ir siekė 22 %, 43 % ir 53 %, atitinkamai džiovinant smulkintą medieną su žieve

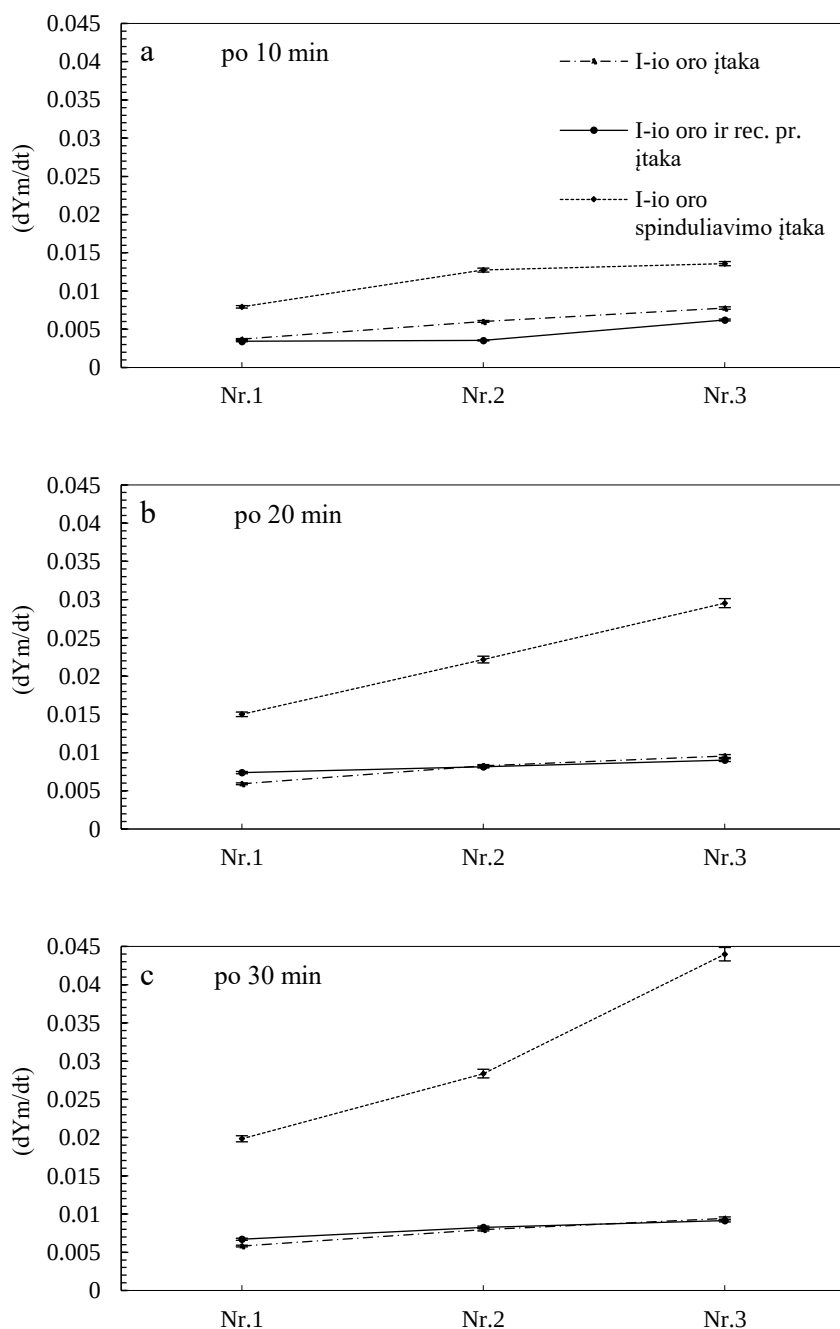
(Nr. 1), su lapais (Nr. 2) ir su spygliais (Nr. 3). Tai rodo, kad didžiausią įtaką drėgmės išsiskyrimo greičiui turėjo spinduliavimas nuo įkaitusių vidinių pakuros paviršių ir nežymiai nuo pirminio oro temperatūros.

Remiantis temperatūrų kitimo kreivėmis (3.16 pav.), galima teigti, kad džiovinant biokuro bandinį Nr. 3, kuriame apie 23 % spyglių, smulkaus biokuro bandinio įkrovos paviršiuje ne tik išsiskirdavo didžioji dalis drėgmės, bet ir užsidegdavo, o tai dar labiau suintensyvindavo biokuro įkrovos drėgmės išsiskyrimą. Išanalizavus biokuro įkrovos sluoksnių temperatūrų pokyčius bei įkrovos vaizdą po eksperimento, nustatyta, kad sudegusio biokuro kiekis nėra didelis, todėl susidaręs vandens kiekis gali būti nevertinamas. Taip pat ir šiluma, gauta dėl biokuro degimo sluoksnyje, vertinama nebuvo, kadangi biokuro įkrovos paviršinio sluoksnio degimas eksperimentinių tyrimų metu truko kelias sekundes ir užsidegimo frontas dėl greta esančių dar santykinai drėgnų (>30 % drėgmės pagal masę) bandinių dalelių neplito. Veikiant smulkintos medienos biokurą Nr. 1 su 200 °C temperatūros oru ir kartu veikiant spinduliavimu iš viršaus, drėgmės pokytis bandinyje po 30 minučių buvo 33 % (po 10 min – 5 %), o džiovinant biokuro bandinį Nr. 3 – net 65 % (po 10 min – 7 %).

3.5. Smulkintos medienos biokuro frakcijos įtaka drėgmės išsiskyrimo greičiui

Iš atliktų tyrimų su skirtingomis biokuro frakcijomis pastebėta, kad bandinių drėgmės išsiskyrimo tendencija yra panaši. Didžiausi drėgmės išsiskyrimo skirtumai pastebėti tiekiant pro ardyno apačią 200 °C temperatūros džiovinimo orą ar oro ir vandens garų mišinį, todėl 3.17 paveiksle pateiktas palyginimas tik su šia džiovinimo agentų temperatūra.

3.17 paveiksle pavaizduota biokuro frakcijos įtaka drėgmės išsiskyrimo greičiui po 10, 20 ir 30 minučių. Lyginant drėgmės išsiskyrimo greičio rezultatus, gautus veikiant smulkintos medienos bandinius su pašildytu pirminiu oru ar oro ir vandens garų mišiniu, nustatyta, kad drėgmės išsiskyrimo greitis buvo gana panašus. Po 10 minučių džiovinimo smulkiausios frakcijos (Nr. 3) biokuro bandinių drėgmės išsiskyrimo greitis buvo 0,006 sant. vnt., stambiausios frakcijos (Nr. 1) tesiekė 0,003 sant. vnt. Tam tikru laiko momentu bandinių drėgmės išsiskyrimo greitis g/s svyravo nežymiai, nepriklausomai nuo džiovinamo bandinio frakcijos (3.17 pav.). Įvedus spinduliavimą kaip intensyvinimo priemonę, išryškėja ženklus drėgmės išsiskyrimo greičio padidėjimas, kuris taip pat priklauso nuo biokuro dalelių dydžio. Pastebėta tendencija, kad kuo smulkintos medienos biokuro dalelės mažesnės, tuo drėgmės išsiskyrimo greitis didesnis. Ši tendencija aiškiai matoma po 30 minučių bandinių džiovinimo. Smulkiausios frakcijos (Nr. 3) drėgmės išsiskyrimo greitis buvo apie 2,3 karto didesnis lyginant su drėgmės išsiskyrimo greičiu veikiant oro ir vandens garų mišiniu stambios frakcijos biokuro bandinį (Nr. 1), kai tuo tarpu jų frakcija skyrėsi apie 1,9 karto. Vidutinės frakcijos (Nr. 2) drėgmės išsiskyrimo greitis buvo apie 1,5 karto didesnis lyginant su drėgmės išsiskyrimo greičiu džiovinant stambios frakcijos biokuro bandinį (Nr. 1), o frakcija skyrėsi tik apie 1,4 karto (2.3 pav.).



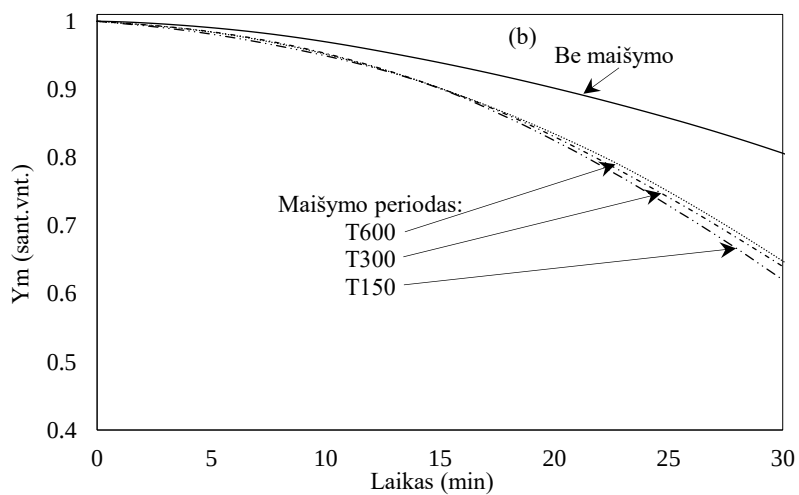
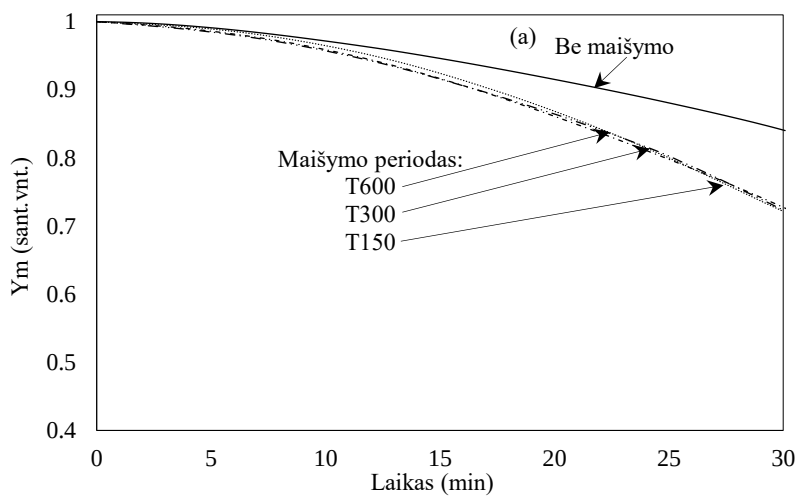
3.17 pav. Smulkintos medienos bandinių Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 3 išbuvimo laiko įtaka drėgmės išsiskyrimo greičiui

3.6. Smulkintos medienos biokuro sluoksnio maišymo įtaka drėgmės išsiskyrimo greičiui

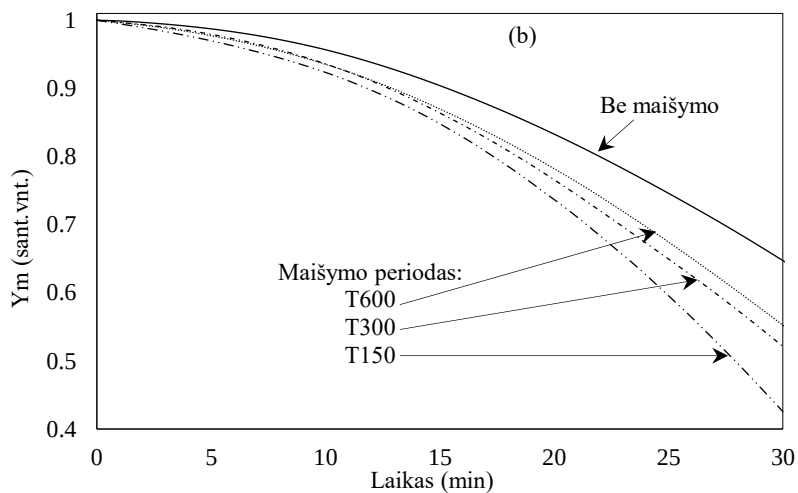
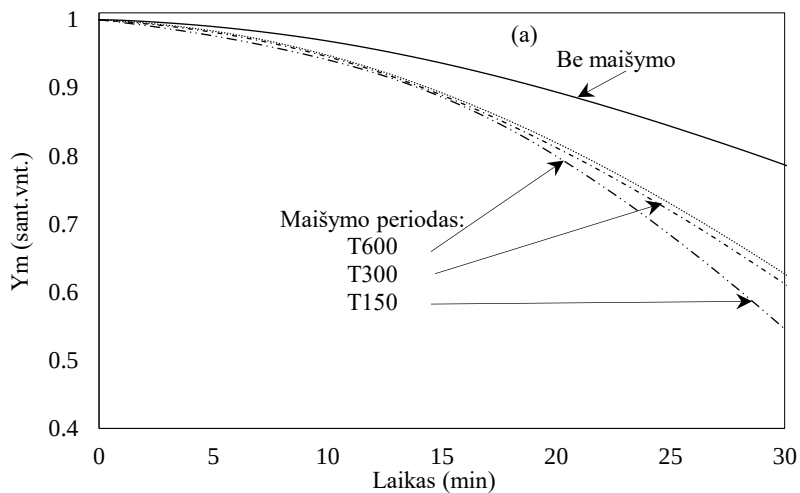
Eksperimentiniai tyrimai atlikti su trimis skirtingomis smulkintos medienos biokuro rūšimis parodė pirminio oro, išeinančių dūmų recirkuliacijos produktų bei spinduliavimo nuo įkaitusių vidinių pakuros paviršių įtaką drėgmės išsiskyrimui ant ardyno, imituojamoje pakuros džiovinimo zonoje. Intensyviausias biokuro bandinių drėgmės išsiskyrimas buvo nustatytas naudojant kombinuotas intensyvinimo priemones, t. y. spinduliavimą bei tiekiant iš ardyno apačios pašildytą sausą orą. Tačiau, norint optimaliai išnaudoti spinduliavimu pernešamą šiluminę energiją ne tik biokuro įkrovos paviršiuje esančių dalelių intensyviai drėgmės išsiskyrimui, bet ir visos biokuro įkrovos drėgmės išsiskyrimui, yra būtinas nuolatinis biokuro maišymas. Stacionarioje biokuro bandinių įkrovoje šilumos pernešimas į vidinius sluoksnius yra vangus, todėl, siekiant drėgmės išsiskyrimo procesą paspartinti ir gauti tolygų biokuro įkrovos įšilimą, įdiegtas bandinių maišymas.

Biokuro įkrovos maišymo metu drėgmės išsiskyrimo procesui įtaką daro tiek konvekcija, tiek ir spinduliavimas, todėl biokuras drėgmės netenka intensyviau bei tolygiau. Realiose pakurose dėl ardelių ciklinio judėjimo vyksta savaiminis biokuro maišymasis. Siekiant imituoti ardelių judėjimą bei sluoksnio maišymąsi pakuroje, eksperimentinėje biokuro džiovinimo kameroje buvo integruotas sraigtinis maišytuvas (2.5 pav.). Biokuro drėgmės išsiskyrimo ir maišymo įtakai nustatyti buvo pasirinktas stambiausios frakcijos tyrimams naudotas smulkintos medienos bandinys (Nr. 1). Atsižvelgiant į realiose pakurose judančių ardelių ciklišumą, atitinkamai pasirinkti biokuro maišymo periodai, kurie bandinį sumaišydavo kas 600 s (T600), 300 s (T300) ir 150 s (T150). Gauti smulkintos medienos bandinių drėgmės išsiskyrimo su maišymu rezultatai buvo lyginami su analogišku atveju, kur eksperimentai atlikti tomis pačiomis darbinėmis sąlygomis tik be maišymo. Tyrimų metu nustatytas biokuro normalizuotos drėgmės kiekio kitimas priklausomai nuo pirminio oro temperatūros ir maišymo periodo, gauti duomenys pateikti 3.18 pav.

Atlikus drėgmės išsiskyrimo tyrimus nestacionariame biokuro sluoksnyje ir išanalizavus gautus rezultatus, nustatyta, kad su 50 °C džiovinimo oro temperatūra maišymo periodo dažnumas biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumui įtakos neturi. Įvedus maišymą, šiuo tyrimo atveju drėgmės pokytis bandinyje po 30 minučių padidėja apie 12 % lyginant su rezultatais, gautais veikiant tos pačios rūšies smulkintos medienos bandinį tik pašildytu oru ir spinduliavimu iš viršaus (3.18 a pav.). Pakėlus tiekiamo oro temperatūrą iki 100 °C, drėgmės pokytis padidėja 15÷17 %. (3.18 b pav.). Toliau keliant oro temperatūrą iki 150 °C arba iki 200 °C, stebimas drėgmės išsiskyrimo suintensyvėjimas priklausomai nuo maišymo periodo. Maišant biokuro įkrovą kas 600 s, drėgmės pokytis padidėja apie 11–16 % lyginant su rezultatais, gautais veikiant bandinį tik pašildytu oru (atitinkamai iki 150 °C ir iki 200 °C) ir spinduliavimu iš viršaus. Tačiau dar dažnesnis sluoksnio maišymas T150 drėgmės pokytį padidina net iki 21–24 % (3.19 a, b pav.). Iš normalizuotos drėgmės kiekio kreivių nustatyta, kad apie 30 minučių veikiant biokurą pašildytu oru (50–200 °C) ir spinduliavimu maišymo periodas tampa reikšmingas tik tiekiant ne žemesnės nei 150 °C temperatūros džiovinimo orą (3.18 a pav.).

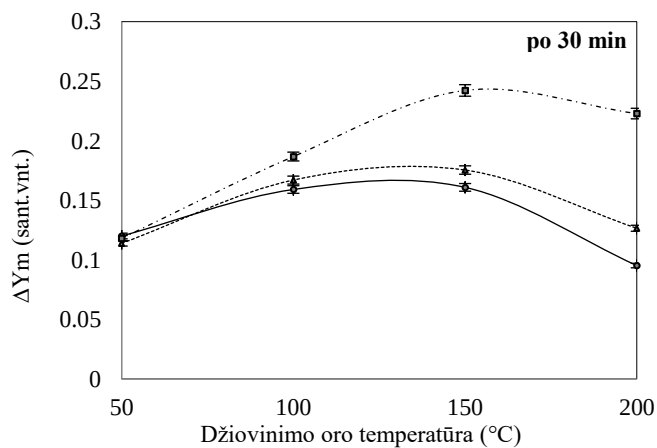
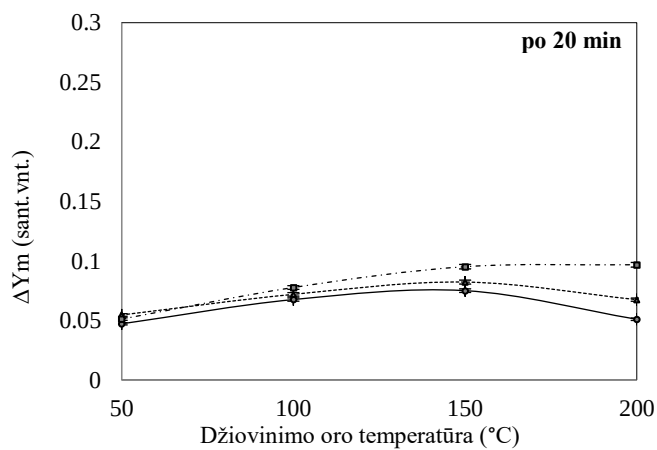
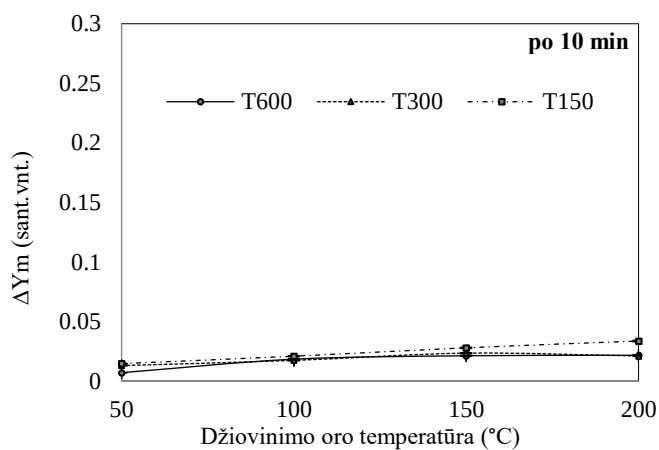


3.18 pav. Drėgmės kiekio (Y_m) bandiniuose kitimas džiovinant su a) 50 °C, b) 100 °C temperatūros oru bei keičiant maišymo periodą kas 600 s, 300 s ir 150 s



3.19 pav. Drėgmės kiekio (Y_m) bandiniuose kitimas džiovinant su a) 150 °C, b) 200 °C temperatūros oru bei keičiant maišymo periodą kas 600 s, 300 s ir 150 s

Smulkintos medienos biokuro įkrovos maišymo intensyvumo įtaka drėgmės pokyčiui džiovinant su skirtingomis džiovinimo oro temperatūromis pateikta 3.20 pav.



3.20 pav. Smulkintos medienos biokuro įkrovos maišymo intensyvumo įtaka drėgmės pokyčiui

Padidinus džiovinimo oro temperatūrą iki 200 °C, maišymo periodas tapo reikšmingas jau po 10 minučių biokuro įkrovos džiovinimo ir, maišant biokurą kas 150 s, normalizuotas drėgmės kiekis sumažėjo 0,03 (apie 3 %). Analizuojant rezultatus, gautus džiovinant smulkintos medienos su žieve biokuro bandinį ir vertinant maišymo dažnumo įtaką drėgmės išsiskyrimo intensyvumui, buvo pastebėta, kad jau po 20 minučių bandinio džiovinimo drėgmės išsiskyrimo intensyvumas didėja tiekiant 100–150 °C temperatūros pirminį orą, o padidinus pirminio oro temperatūrą iki 200 °C, maišymo įtaka biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumui sumažėja, tačiau padidėja maišymo periodo dažnumo įtaka (iki 4,5 %). Biokuro maišymo intensyvumo įtaka tampa dar ryškesnė analizuojant rezultatus, gautus po 30 minučių bandinio džiovinimo.

Eksperimentiniai tyrimai, atlikti stacionariame biokuro įkrovos sluoksnyje, parodė, kad aukšta (200 °C) pirminio oro temperatūra lemia didžiausią drėgmės išsiskyrimo greitį, todėl maišymo procesas turi mažesnę įtaką bandinių drėgmės išsiskyrimo intensyvumui lyginant su rezultatais, gautais džiovinant bandinius su 100–150 °C temperatūros pirminiu oru. Džiovinant smulkintos medienos biokurą su 200 °C temperatūros pirminiu oru, nustatyta, kad normalizuotas drėgmės kiekio pokytis didėja intensyvinant sluoksnio maišymą. Ši drėgmės išsiskyrimo greičio priklausomybė nuo maišymo dažnio rodo, kad kai džiovinimo oro temperatūra yra aukšta (200 °C), išryškėja spinduliavimo įtaka biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumui.

Nustatyta, kad efektyviausias sluoksnio maišymas yra tuomet, kai smulkintos medienos biokuras džiovinamas 30 minučių, džiovinimo oro temperatūra 150 °C ir sluoksnio maišymas kartojamas kas 150 sekundžių.

4. VIRTUALAUS JUTIKLIO PRITAIKYMAS PAKUROS REGULIAVIMUI PAGAL NUSTATYTĄ KURO DRĖGNUMĄ

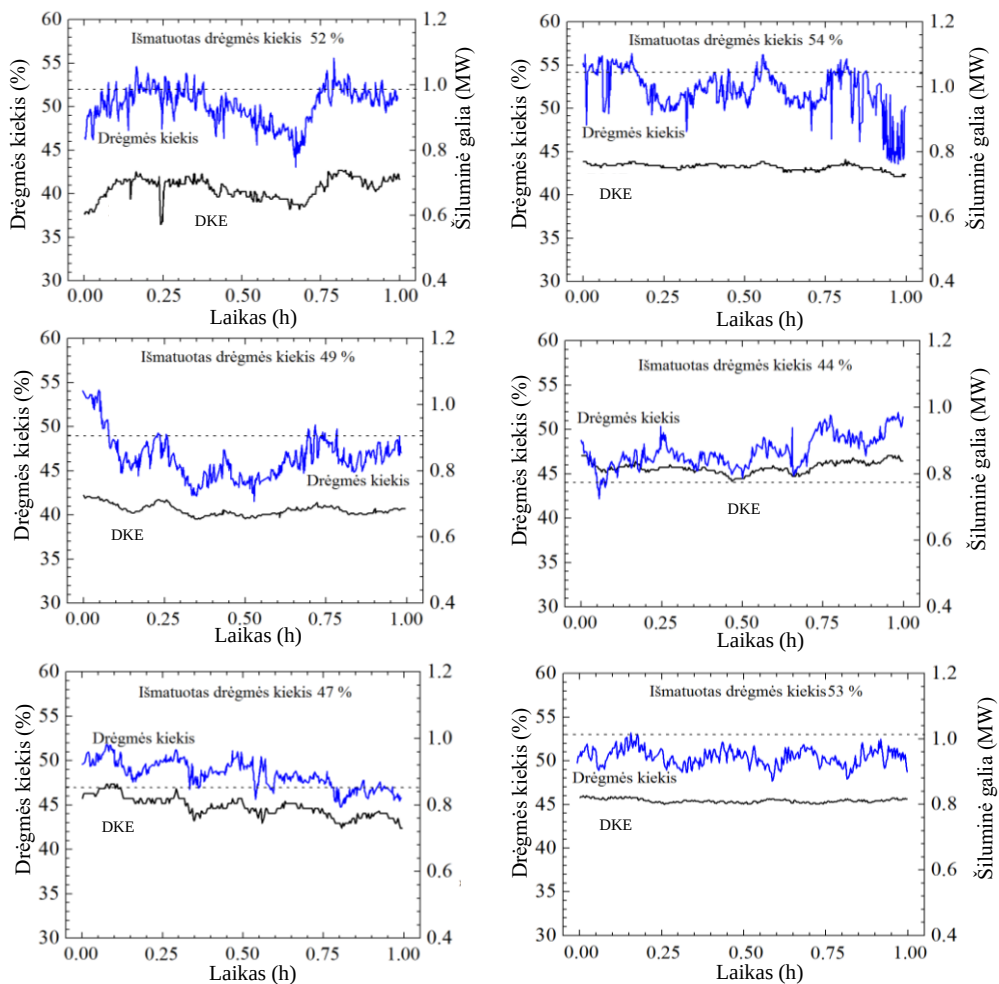
Atlikus laboratorinius eksperimentinius tyrimus, buvo nustatytos pagrindinės priemonės, kurios labiausiai daro įtaką pakuroje vykstančiam drėgno biokuro drėgmės išsiskyrimo procesui. Taikant šias kombinuotas priemones, galima intensyvinti arba lėtinti visą degimo procesą priklausomai nuo deginamo biokuro drėgnumo. Tačiau, nors ir žinant intensyvinimo priemones, realiose pakurose vis dar trūksta matavimo įrenginių, kurie leistų realiu metu matyti tiekiamo į pakurą biokuro drėgnumą ir tuomet jau taikyti labiausiai tinkančias tam priemones. Kaip jau buvo minėta literatūros apžvalgoje, rinkoje esantys drėgmės matavimo prietaisai dėl įvairių priežasčių sunkiai pritaikomi pakurose, todėl atliktas virtualaus jutiklio tyrimas realioje vidutinės galios eksploatuojamoje biokuro pakuroje. Siekiant visiško pakuros automatizuoto valdymo, tyrimo metu įvertintas sukurto metodo tikslumas smulkintos medienos biokuro deginimo metu, tai pat atlikti biokuro bandinių tiesioginiai drėgmės kiekio matavimai. Sukurtas algoritmas integruotas į duomenų surinkimo ir apdorojimo programos (toliau – SCADA) sistemą. Kelias dienas buvo analizuojami biokuro bandiniai ir registruojami integruoti duomenys (4.1 lentelė).

4.1 lentelė. Drėgmės kiekio matavimų duomenys biokuro katilo eksploatacijos metu

Parametras	T_21	T_22	T_23	T_24	T_25	T_26
mėnesis diena	11 07	11 15	11 22	11 29	11 30	12 05
Medienos skiedrų biokuro drėgmė, %	52,1	54,2	49,1	44,3	47,2	53,0
<i>Katilo parametrai:</i>						
Katilo našumas, MW	3,32	3,34	3,35	4,09	4,16	3,96
DKE našumas, MW	0,70	0,75	0,68	0,79	0,80	0,81
Išmetamųjų dūmų temperatūra, °C	137,3	141,0	144,1	153,1	152,6	151,2
Išmetamųjų dūmų ventiliatoriaus dažnis, Hz	24	27	30	32	32	33
Apskaičiuotas kuro kiekis, kg/h	720	736	749	863	889	790
<i>Drėgmės kiekio biokure įvertinimas iš DKE šilumos balanso</i>						
Apskaičiuota drėgmė išmetamuosiuose dūmuose, kg/h	724	846	655	715	785	831
Apskaičiuota drėgmė biokure, %	50,2	53,5	46,7	45,3	46,9	51,3
Nuokrypis nuo išmatuotos drėgmės, %	1,9	0,7	2,4	1	0,3	1,7

Surinkus ir apdorojus duomenis, nustatyta, kad apskaičiuotas biokuro drėgmės kiekis buvo artimas kaip ir tirtas laboratorijoje tiesioginio matavimo būdu. Atlikus šilumos balanso skaičiavimus, nustatyta, kad maksimalus nuokrypis, lyginant su tiesioginio matavimo reikšmėmis, neviršijo 2,4 % pagal masę (4.1 lentelė). Tyrimų metu lygiagrečiai šilumos balanso skaičiavimams RH jutikliu buvo matuojamas drėgmės kiekis išeinančiuose dūmuose. Tačiau šiuo atveju buvo pastebėti didesni rezultatų neapibrėžtumai ir išmatuotų reikšmių nuokrypis viršijo 6 % pagal masę. Tokio didelio netikslumo priežastis yra išmetamųjų dūmų santykinės drėgmės priklausomybė nuo temperatūros. Esant aukštai temperatūrai, RH jutiklis pasiekia instrumentinę matavimo ribą, kuri yra nuo 2 iki 98 %. Hermansson S. ir kt. (Hermansson, Lind, Thunman 2011) savo darbe gavo panašius rezultatus ir taip pat pastebėjo mažą RH metodo tikslumą.

Norint nustatyti esamą drėgmės kiekį biokure kiekvieno eksperimento metu, laboratoriniams tyrimams 10 minučių intervalu imami penki tiekiamo į pakurą kuro bandiniai. Vidutinės biokuro bandinių drėgmės kiekio vertės pateiktos 4.1 lentelėje ir pažymėtos punktyrine linija 4.1 pav. Šiame paveiksle pateiktos kreivės rodo apskaičiuoto biokuro drėgmės kiekio pokyčius iš DKE šilumos balanso, kuro deginimo metu, pasirinktomis skirtingų dienų valandomis ir esant skirtingoms kuro drėgmės vertėms.



4.1 pav. Tiesiogiai išmatuotas drėgmės kiekis biokure (brūkšninė linija) lyginant su netiesioginiu metodu apskaičiuotomis reikšmėmis ir DKE šiluminis našumas biokuro katilo eksploatavimo metu skirtingomis dienomis.

Kadangi apskaičiuotasis drėgmės kiekis tiesiogiai priklauso nuo DKE šiluminės galios, didesnis kuro drėgmės kiekio nuokrypis atsiranda esant didesniems ekonomaizerio šilumos galios svyravimams. Išanalizavus kondensacinio ekonomaizerio (DKE) apkrovimo kreives nustatyta, kad matavimų metu, kai į pakurą

tiekiamas 52 % arba 49 % drėgmės pagal masę smulkintos medienos biokuras, DKE aprova matavimo metu nestabili, o tai lemia didesnį drėgmės kiekio vertės kure nustatyto nuokrypį. Esant stabiliam DKE apkrovimui ir tiekiant į pakurą 53 % drėgmės pagal masę biokurą, apskaičiuotos drėgmės kiekio biokure vertės svyruoja ne daugiau 5%. Nustatyta, kad apskaičiuotas biokuro drėgmės kiekis priklauso ne tik nuo ekonomizerio šiluminės galios, bet ir nuo kitų netiesioginių matavimų. Matavimų metu, tiekiant 54 % drėgmės pagal masę biokurą, kai DKE veikia sklandžiai, tačiau esant netolygiam išmetamųjų dūmsiurbės variklio dažniui, kuris gali būti dėl įvairių priežasčių: pakuros ar katilo užterštumas ir papildomas oro įsiurbimas išmetamųjų dūmų ortakyje, nustatyti apskaičiuotos drėgmės kiekio biokure svyravimai buvo apie 10 %. Taigi, atlikti eksperimentai leidžia manyti, kad netiesioginis kuro drėgmės kiekio apskaičiavimo metodas pagal DKE šilumos balansą yra tinkamas taikyti smulkintos medienos biokurą deginančiose įrenginiuose. Siekiant išvengti trumpalaikių išmatuotų parametrų svyravimų įtakos, apskaičiuotas drėgmės kiekis biokure turi būti vidurkinamas pagal laiką. Pagal drėgmės kiekio biokure apskaičiavimo metodiką sudarius kontrolinį algoritmą, priklausomai nuo didėjančio arba mažėjančio kuro drėgmės kiekio, pakuros valdymo automatika gali atitinkamai koreguoti darbinių parametrų vertes, tam, kad kuras visiškai ir optimaliai sudegtų.

4.1. Biokuro drėgmės prognozavimas automatiniam pakuros valdymui

Ryšys tarp drėgmės kiekio pokyčio ir šiluminės DKE apkrovos buvo nustatytas atliekant smulkintos medienos biokuro degimo bandymus realioje 6 MW galios pakuroje. Tačiau būtina įvertinti pakuros veikimą ir jautrumą automatizuotam darbui tiekiant skirtingos drėgmės biokurą.

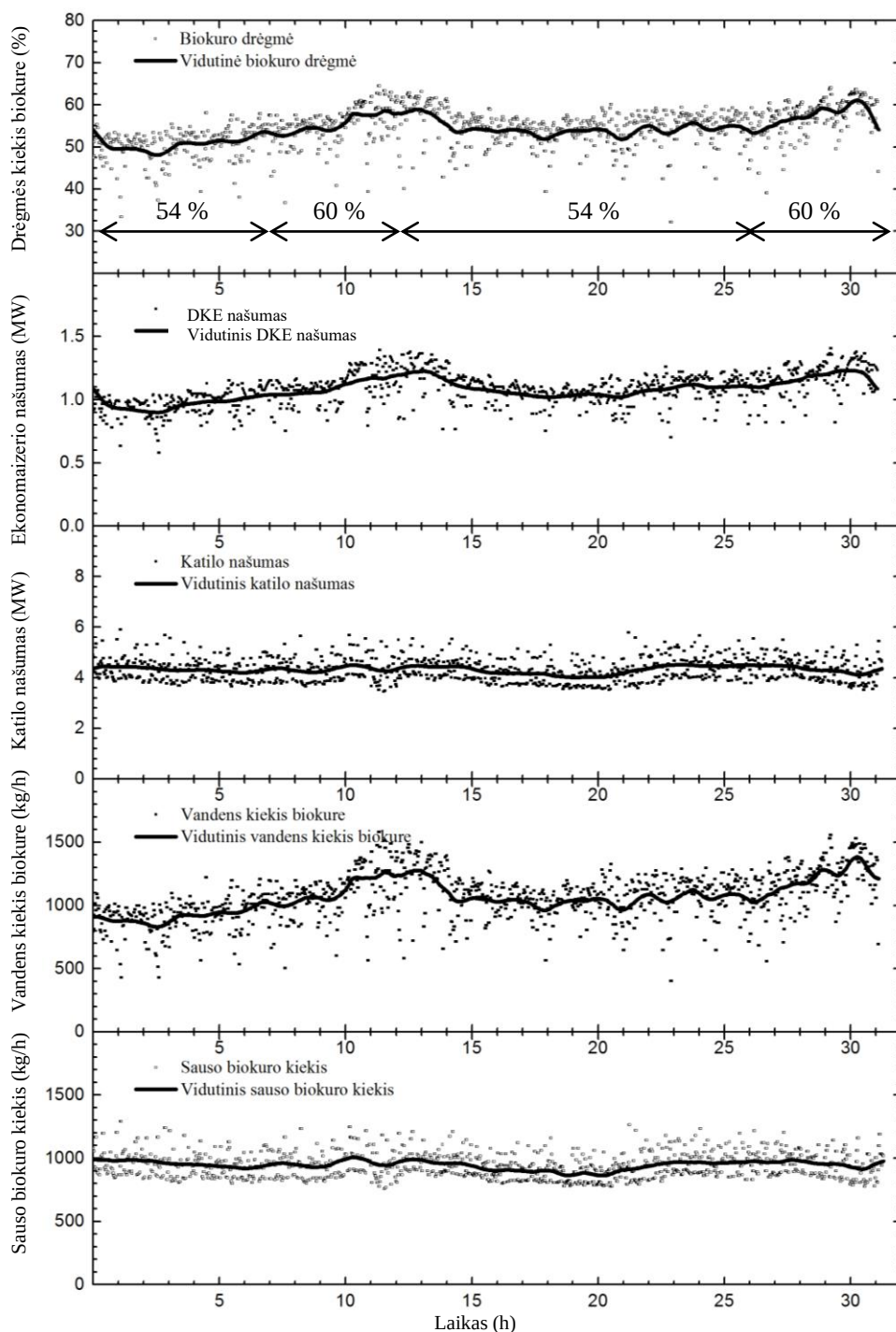
Siekiant įvertinti sudarytą kuro drėgmės kiekio prognozės metodą, buvo atliktas dviejų dienų trukmės eksperimentinis bandymas. Pasitelkiant SCADA sistemą, duomenys buvo fiksuojami nepertraukiamai. 4.2 pav. pateikti apskaičiuotų (drėgmės kiekio biokure, vandens kiekio biokure ir sauso kuro kiekio) bei išmatuotų (DKE ir katilo našumai) parametrų pokyčiai eksperimento laikotarpiu. Be to, paveiksle nurodyti kuro padavimo periodai. Eksperimentai buvo pradėti nuo 0 iki 7 val. paduodant į pakurą 54 % (pagal masę) drėgmės biokurą. Laikotarpiu nuo 7 iki 12 valandų į pakurą buvo paduodamas kuras, kurio drėgmės kiekis buvo 60 % pagal masę. Naktį (12–24 val.) katilas buvo paliktas veikti tiekiant sausesnį biokurą, kurio drėgmės kiekis neviršijo 54 % drėgmės pagal masę. Galiausiai, nuo 26 iki 30 bandymo valandos vėl buvo tiekiamas smulkintos medienos biokuras su didesniu drėgmės kiekiu (~60 %). Būtina pastebėti, kad po 30,5 valandos bandymo, išmetamųjų dūmų kondensacinio ekonomizerio vandens cirkuliacinis siurblys sugedo ir jį reikėjo išjungti. Dėl šios priežasties buvo neįmanoma įvertinti kreivių stabilizavimo.

SCADA sistemoje nurodytos vertės buvo fiksuojamos kiekvienu laiko periodu $\Delta t = 00:00:55$. Reikšmių išsidėstymas yra labai netolygus, o tai reiškia, kad yra gana didelė svyravimų amplitudė. Norint pašalinti triukšmą, signalai buvo apdoroti (glotninami) naudojant svertinį vidurkį:

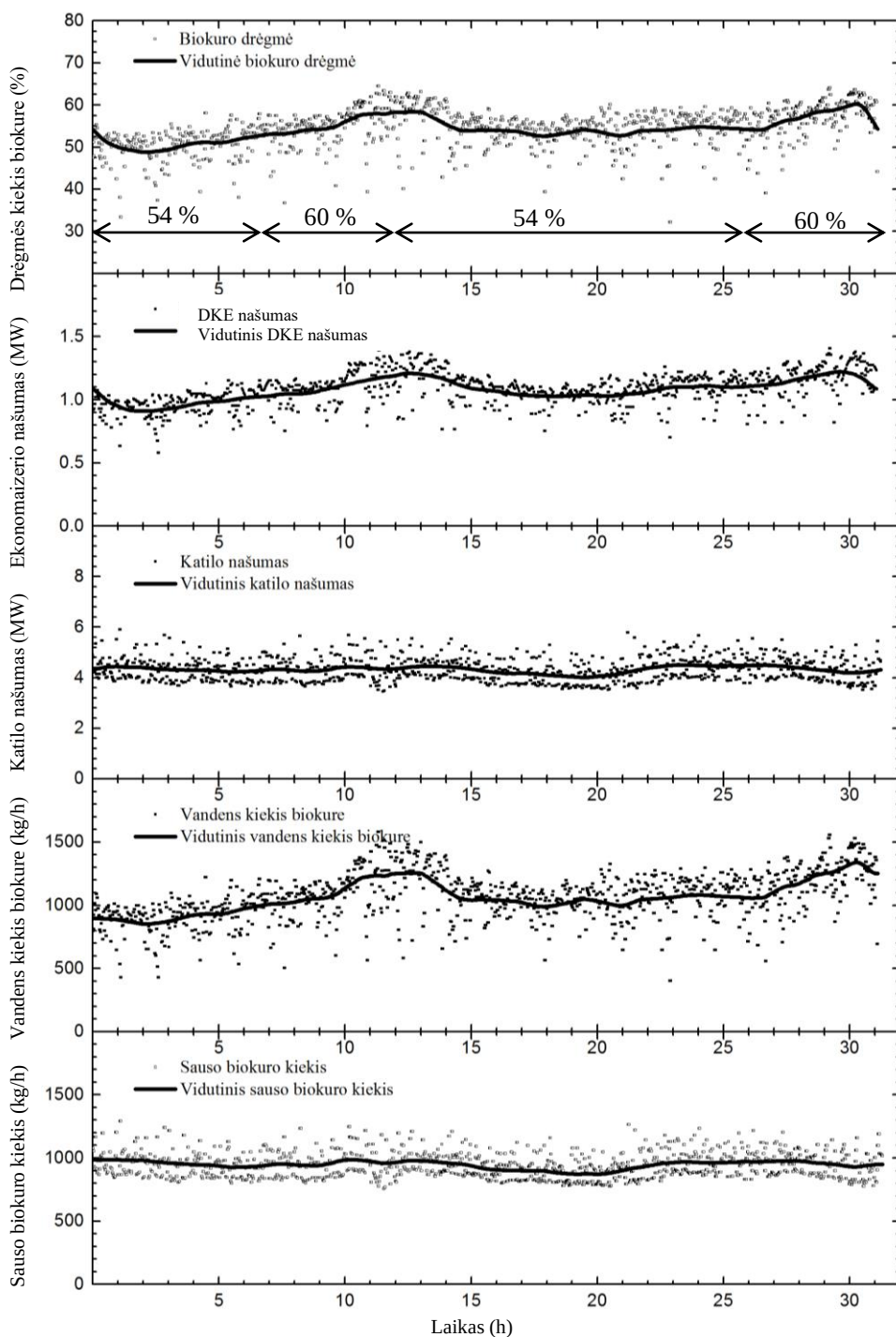
$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=-n/2}^{n/2} \omega_i x_{j-i}}{\sum_{i=-n/2}^{n/2} \omega_i}, j = [0, N - 1], x_j = x(t_j), t_j = t_0 + j\Delta t, \Delta t = 55 \text{ s} \quad (29)$$

čia $\bar{x}_j$ – vidutinė išlyginta matuojamo parametro vertė; n – matavimo taškų skaičius (vnt.); i – matavimo taškas; ω – svorio faktorius; x – matuojamo parametro vertė; j – matavimo taško imtis; t – laikas (s); Δt – laiko pokytis (s); N – matavimų periodas.

Apdorojus duomenis, pokyčiai nustatyti esant užsiduotiems darbiniam pakuros parametrams ir tiekiant skirtingo drėgmės kiekio smulkintos medienos biokurą. 4.2 paveiksle pateikti duomenys, kai vidurkinimo filtro lango plotis n yra 101 matavimo taškas, t. y. 46 min 17 s į abi puses nuo esamo taško. Išanalizavus gautus tiekiamo į pakurą biokuro drėgmės kiekio rezultatus, nustatyti 5 % svyravimai tam pačiam kuro tipui. Taip yra todėl, nes vidurkinimo filtro lango plotis nepakankamas ir toks duomenų apdorojimo būdas gali būti netinkamas naudoti automatizuotam koregavimui, nes tai gali sukelti degimo proceso nestabilumą. Padidinus filtro lango plotį iki 151 matavimo taško (1 h. 9 min 12 s), gautos minimalios ir maksimalios kuro drėgmės kiekio vertės (4.3 pav.). Tai pat nustatyta, kad sistema yra gana inertiška, o biokuro drėgmės pokyčiai iš vienos vertės į kitą lemia pereinamąjį iki 3 valandų laikotarpį. Tam įtakos turi kuro padavimo sistema ir pakuros dydis: kuro padavimo talpykloje, įrengtoje prieš krosnį, yra iki 1 tonos smulkintos medienos biokuro, o visas degimo ciklas ardyninėse pakurose užtrunka iki 30 min. Be to, reikia papildomo laiko biokurui saugykloje pakeisti ir paduoti į pakurą.

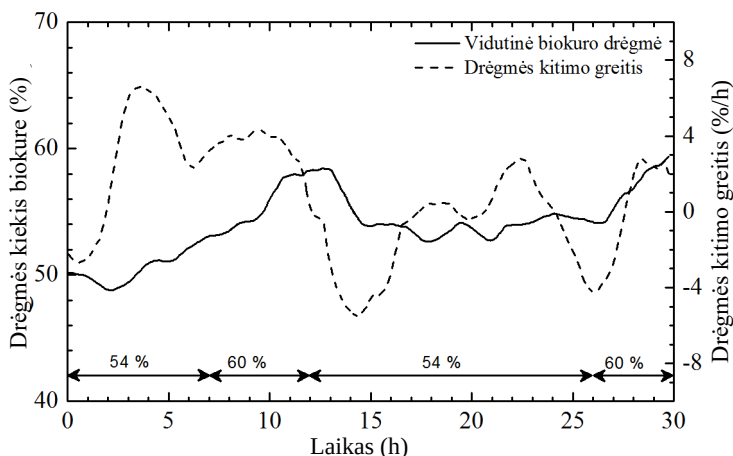


4.2 pav. Apskaičiuotų (drėgmės kiekio, vandens kiekio ir sausos masės biokure kiekio) bei išmatuotų (DKE ir katilo našumų) parametų pokyčiai. Slenkamasis svertinis vidurkis apskaičiuotas $n = 101$ matavimo taškui



4.3 pav. Apskaičiuotų (drėgmės kiekio, vandens kiekio ir sausos masės biokure kiekio) bei išmatuotų (DKE ir katilo našumų) parametų pokyčiai. Slenkamasis svertinis vidurkis apskaičiuotas $n = 151$ matavimo taškui

Siekiant įvesti korekcijos koeficientą automatiniam krosnies valdymui dėl kure esančio drėgmės kiekio, apskaičiuoto pagal lygtį (29), būtina išanalizuoti drėgmės kiekio pakyčius laiko atžvilgiu. Laikino drėgmės padidėjimo ar sumažėjimo intensyvumas buvo stebėtas apskaičiuojant vidutinės biokuro drėgmės išvestinę pagal laiką $\frac{d\bar{Y}^{HB}}{dt}$, (4.4 pav.).



4.4 pav. Drėgmės kiekis biokure (ištinė linija) ir drėgmės kitimo greitis (punktinė linija) katilo veikimo metu. Slenkamasis svertinis vidurkis apskaičiuotas $n = 151$ matavimo taškui

Vidutinės biokuro drėgmės kiekio išvestinės pagal laiką teigiama vertė rodo drėgmės kiekio padidėjimą išmetamosiose dujose, o neigiamas – sumažėjimą, nulinė reikšmė rodo, kad drėgmės kiekio pokyčių nėra. Tai pat ši kreivė nusako momentą, kai biokuro drėgmės kiekis pasiekė didžiausią ar mažiausią vertę, t. y., kai pakura perjungia veikimą į kitos rūšies biokurą. Pirmas didžiausias biokuro drėgmės kiekio pokyčio pikas nustatytas praėjus 3 h po to, kai buvo pradėtas tiekti biokuras, kurio drėgmės kiekis 54 % pagal masę. Vėliau išvestinė pradėjo artėti prie nulio ir, jei tų pačių parametrų biokuras tiekiamas ilgesnį laiką, drėgmės kitimo greitis priartėja prie 0, o tai rodo drėgmės kiekio biokure stabilizavimą. Po 7 darbo valandų į krosnį pradėtas tiekti 60 % drėgmės pagal masę smulkintos medienos biokuras. Ši biokuro kaita turi įtakos kitam kuro drėgmės kiekio pokyčio pikui (4 %/h) drėgmės kitimo greičio padidėjimui) dešimtą darbo valandą. Per naktį sistema buvo palikta veikti tiekiant į pakurą sausesnį, t. y. 54 % drėgmės pagal masę biokurą, todėl kuro drėgmės kiekio kitimo greitis nuo 12 darbo valandos mažėjo bei pasiekė žemiausią lygį po 14 valandų nuo matavimo pradžios. Panašios drėgmės kiekio kitimo greičio tendencijos gautos ir antrąjį matavimų dieną, kai vėl į biokuro pakurą pradėtas tiekti labai drėgnas (60 % pagal masę) biokuras (26-tą darbo valandą). Remiantis šia analize nustatyta, kad efektyviausias proceso kontrolei būdas yra vidutinės biokuro drėgmės kiekio išvestinės pagal laiką panaudojimas, t. y., kai $\frac{d\bar{Y}^{HB}}{dt} \neq 0$, sistema turi reaguoti ir pradėti keisti pakuros nustatytus darbinis parametrus: ardymo judėjimo dėsnį, išmetamųjų recirkuliacijos dūmų tiekimą, pirminio oro parametrų bei kiekio kitimą ir t. t.

Matuojant pakuros išėities duomenis realiu laiku, nėra jokios galimybės glotninti duomenų pagal lygtį (29), nes į glotninimą negalima įvesti taškų, kurie bus ateityje ir dar nėra neišmatuoti. Todėl matuojant realiaime laike glotninama pagal tokią formulę (30):

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \omega_i x_{j-i}}{\sum_{i=0}^{n-1} \omega_i}, j = [0, N - 1], x_j = x(t_j), t_j = t_0 + j\Delta t, \Delta t = 55 \text{ s} \quad (30)$$

(30) lygties pagalba suglotnintas biokuro drėgmės kiekis atsiliks nuo realaus laiko matavimų per pusę filtro lango pločio. Jei filtro lango taškų skaičius n yra 151, bendras filtro lango laiko plotis yra 2 h 18 min ir 24 s, o pusė pločio yra 1 h 9 min ir 12 s. Tokiu atveju, kiekvienu momentu egzistuoja vidutinė (išlyginta) biokuro drėgmės kiekio vertė, buvusi prieš 1 h 9 min ir 12 s.

Galima daryti prielaidą, kad $\sim 27,5$ darbo valandą vidutinis drėgmės pokytis tampa teigiamas ($\frac{d\bar{Y}^{HB}}{dt} > 0$). Tai reiškia, kad tiekiamo į pakurą biokuro savybės keičiasi, drėgmės kiekis biokure pradeda didėti prieš 1 h 9 min ir 12 s. Tokiu būdu automatizuota valdymo grandinė seka, kaip kinta drėgmės kiekis biokure ir pagal jo kitimo greitį nustato, kada bus pasiekta didžiausia leistina pasirinkto režimo vertė. Jei drėgmės kiekio išvestinė pagal laiką mažėja, iš greičio sumažėjimo (t. y. drėgmės kitimo pagreitį) galima prognozuoti, kada ji bus lygi nuliui, t. y., kada procesas stabilizuosis ir pakeitimai nebus būtini. Pagal drėgmės kiekio pokyčius nustačius sklandaus proceso parametrų perėjimo pobūdį, biokuro džiūvimą bei degimą lemiantys veiksniai (pirminio oro ir išmetamųjų dūmų parametrai, ardyno judėjimas), gali būti keičiami palaipsniui, o ne intervalais.

Sudarytas biokuro pakuros valdymo algoritmas (4.5 pav.) prieš tai aprašyto netiesioginio biokuro drėgmės kiekio prognozės metodui pritaikyti. Remiantis gautomis vertėmis, priklausomai nuo didėjančio arba mažėjančio kuro drėgmės kiekio, į pakuros valdymo automatiką turi būti įdiegta korekcija. Valdymo algoritmas sudaro biokuro drėgmės kiekio prognozavimo metodiką, pateiktą šio darbo 2.3 skyriuje. Iš DKE šilumos balanso, detaliau aprašyto 2.3 skyriuje, ir lygties (18) apskaičiavus kuro drėgmės kiekį Y^{HB} , apskaičiuojamas vidutinis drėgmės kiekis $\bar{Y}_j^{HB}$ naudojant realaus laiko išlyginimo funkciją (31):

$$\bar{Y}_j^{HB} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} Y_i^{HB} x_{j-i}}{\sum_{i=0}^{n-1} Y_i^{HB}}, j = [0, N - 1], x_j = x(t_j), t_j = t_0 + j\Delta t, \Delta t = 55 \text{ s} \quad (31)$$

Norint atlikti šiuos apskaičiavimus algoritme, katilo sureguliovimo metu būtina įvertinti laiko intervalą dt . d/dt cikle laiko išvestinė $d\bar{Y}_j^{HB}$ apskaičiuojama laiko momentu t :

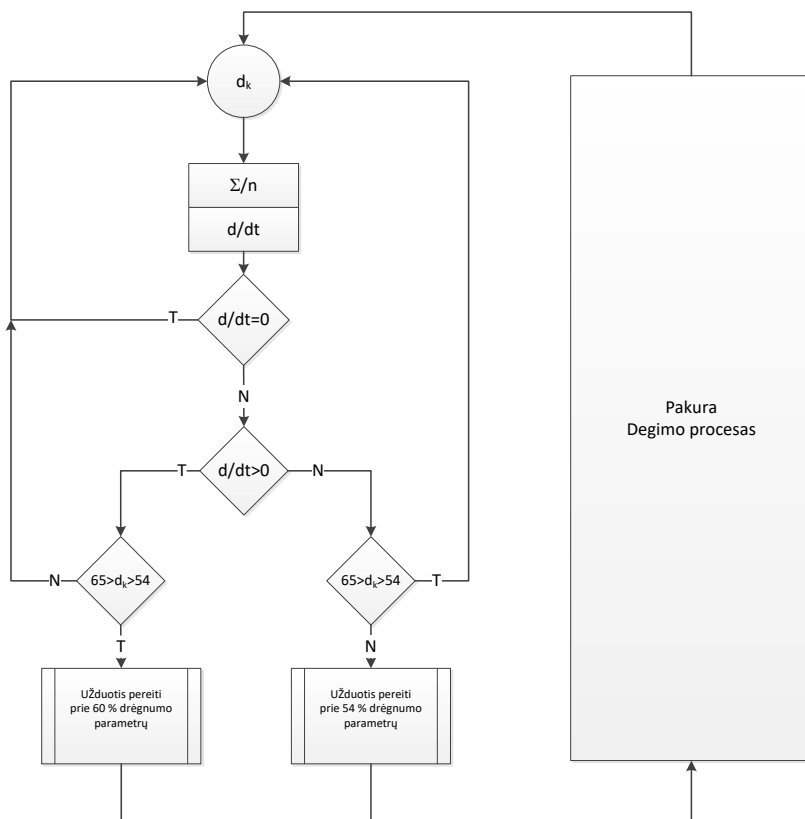
$$\frac{d}{dt} = \frac{d\bar{Y}^{HB}}{dt} = \frac{m_{mfg}^{HB}}{m_{mfg}^{HB} + \frac{Q_B}{LVH \cdot \eta}} 100/dt \quad (32)$$

Tiekiamo į pakurą biokuro drėgnumas d_k , % apskaičiuojamas:

$$d_k = \frac{m_{mfg}^{HB}}{m_{mfg}^{HB} + \frac{Q_B}{LVH \cdot \eta}} 100 \quad (33)$$

Jei išvestinė yra lygi nuliui ($\frac{d\overline{Y}^{HB}}{dt} = 0$), ciklas pradedamas iš naujo; jei išvestinė yra didesnė už nulį, ciklas tęsiasi, pakuros automatizuotos valdymo užduotys pataisomos naudojant šią sąlygą $d/dt > 0$ ($\frac{d\overline{Y}^{HB}}{dt} > 0$). Jei reikšmė $d\overline{Y}_j^{HB}$ atitinka sąlygą $65 > \overline{Y}_j^{HB} > 54$, automatinis krosnies valdymas prisitaiko prie parametrų, atitinkančių drėgmės kiekį 60 % (pagal masę). Priešingu atveju pakuros kontrolė prisitaiko prie parametrų, atitinkančių 54 % (pagal masę) drėgmės kiekį.

Kuro drėgmės prognozavimo algoritmas suteikia pažangią kontrolės strategiją, skirtą efektyviam ir stabiliam smulkintos medienos biokuro degimui su per laiką kintančiu drėgmės kiekiu. Tokia valdymo strategija leidžia užtikrinti stabilų kuro padavimą į pakurą keičiant ardyno judėjimo dažnį. Be to, išmetamųjų dūmų drėgmės kiekio apskaičiavimas leidžia įdiegti korekcijos koeficientą deguonies kiekiui išmetamosiose dūmuose matuoti ir oro pertekliui sumažinti. Pastarasis leidžia sumažinti šilumos nuostolius ir didina termofikacinės elektrinės efektyvumą.

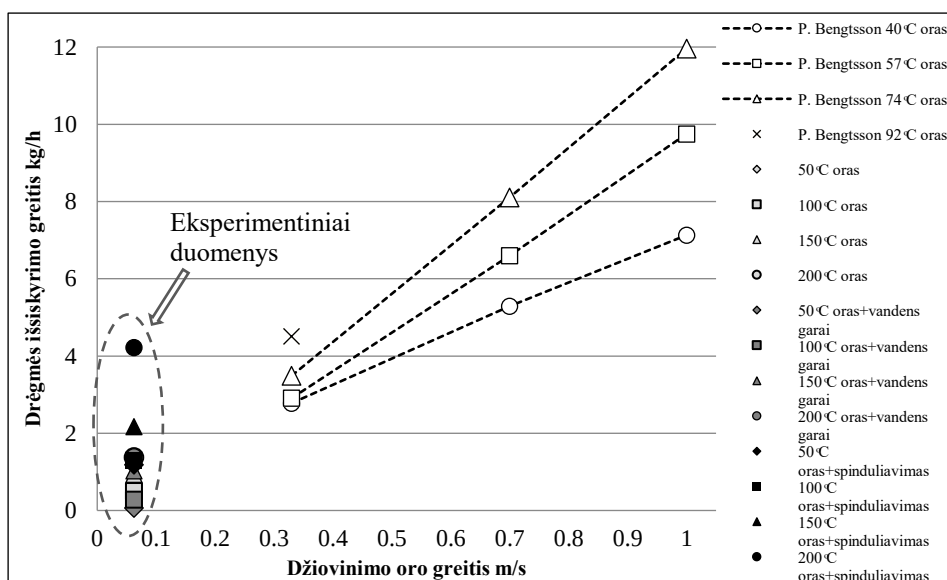


4.5 pav. Kuro drėgmės įvertinimo automatiniam pakuros valdymui algoritmas

5. GAUTŲ REZULTATŲ APIBENDRINIMAS IR PALYGINIMAS SU KITŲ TYRĖJŲ REZULTATAIS

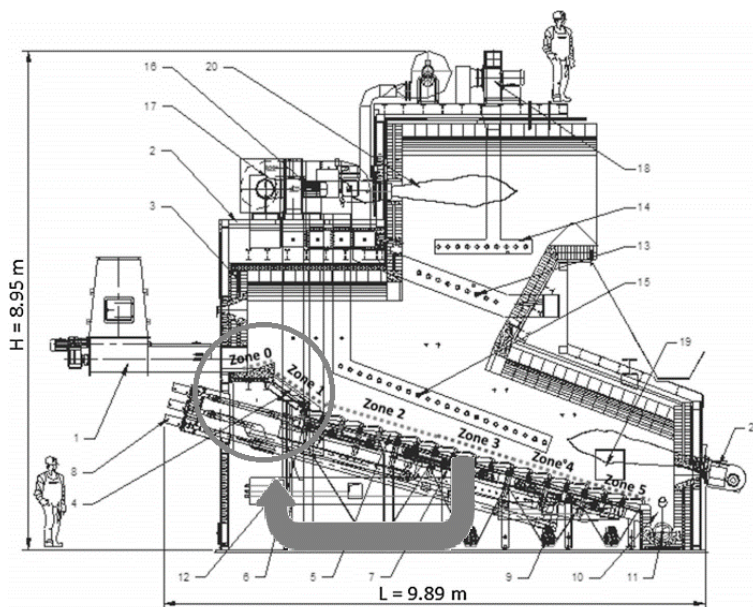
Pritaikius virtualaus jutiklio algoritmą pakurai automatizuoti, remiantis nustatytais smulkintos medienos biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumo tyrimų rezultatais bei priklausomybe nuo džiovinimo oro ar oro ir vandens garų mišinio temperatūros ir ardymo judėjimo dažnio analize, seka rekomendacijos ateities darbams.

Apžvelgus kitų mokslininkų darbus ir palyginus gautus tyrimų rezultatus (5.1 pav.), nustatyta, kad biokuro drėgmės išsiskyrimo greitis priklauso ne tik nuo tiekiamo per biokuro sluoksnį oro temperatūros, bet ir nuo oro srauto greičio. Drėgmės išsiskyrimo intensyvinimui rekomenduojama padidinti oro srauto greitį pakuros džiovinimo zonoje. Tačiau, didinant paduodamo oro srautą, būtina atsižvelgti į oro srautus kitose pakuros zonose, kad nebūtų oro pertekliaus degimo procesų metu.



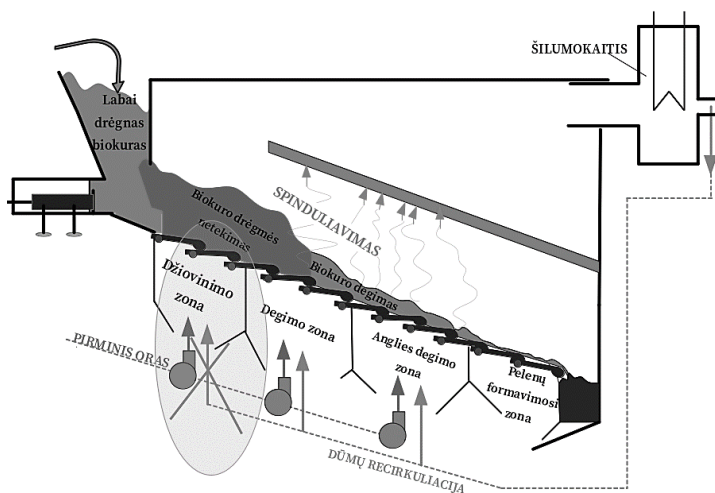
5.1 pav. Džiovinimo oro srauto greičio įtaka biokuro drėgmės išsiskyrimo greičiui (Bengtsson 2015)

Smulkintos medienos biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumo tyrimų metu nustatyta, kad didelę įtaką turi pirminio oro, paduodamo iš apačios ardymo, temperatūra. Norint paspartinti savaiminį liepsnos plitimą biokure, biokuro drėgmės kiekis turi būti sumažintas iki $< 45\%$ pagal masę (Thunman, Leckner 2001). Tai galėtų būti pasiekama grąžinant karštus degimo produktus iš pakuros degimo zonos į džiovinimo zoną (5.2 pav.), tokiu būdu pirminio oro temperatūrą galima padidinti net iki $900\text{ }^{\circ}\text{C}$.



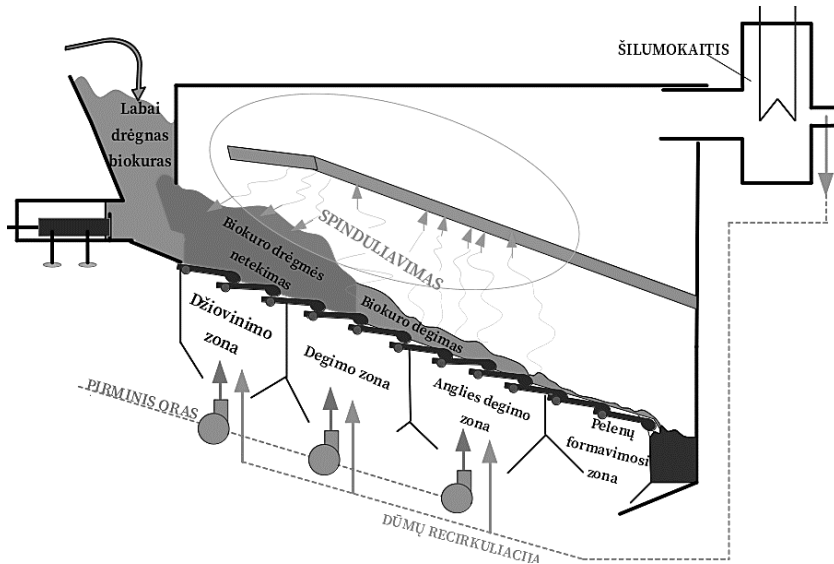
5.2 pav. Biokuro pakuros suskirstytos zonomis principinė schema

Išanalizavus smulkintos medienos biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumo rezultatus (3.4 skyrius), kai biokuro įkrova veikiama 50–200 °C temperatūros oro ir vandens garų mišiniu, nustatyta, kad išeinančių dūmų recirkuliacija temperatūroms biokuro sluoksnyje bei degimo zonoje mažinti, lėtina biokuro drėgmės išsiskyrimo procesą. Drėgnų dūmų (5.3 pav.) į pakurą grąžinimas suintensyvina kondensacijos ant medienos dalelių procesą visuose įkrovos sluoksnio aukščiuose. Todėl į pakurą tiekiant labai drėgną (60 % ir daugiau pagal masę) biokurą rekomenduojama padidinti recirkuliacijos dūmų temperatūrą iki 200 °C arba išvis nutraukti jų tiekimą į pakuros džiovinimo zoną.



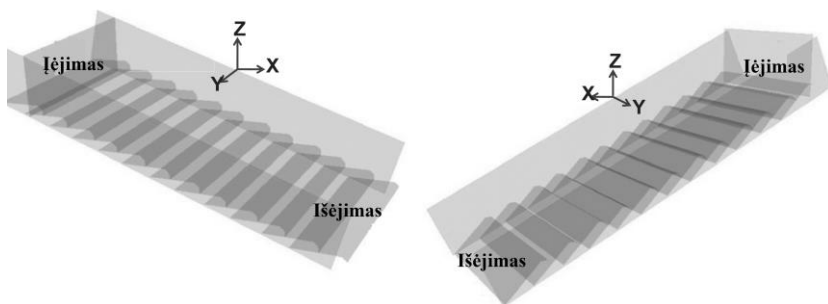
5.3 pav. Biokuro degimas pakuroje ant ardyno (schema modifikuota iš (STRZALKA 2013))

Atlikus literatūros apžvalgą (Sheikholeslami, Watkinson 1992; Martinez-garcia et al. 2015) ir apibendrinus atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatus, kurių metu tirta spinduliavimo nuo vidinių pakuros paviršių į biokuro sluoksniu paviršių įtaka biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumui (3.5 skyrius). Nustatyta, kad šiluminė spinduliuotė turi didelę įtaką biokuro drėgmės išsiskyrimo intensyvumui, todėl naujų sumaniųjų biokuro pakurų projektuotojams rekomenduojama vidinį pakuros skliautą, atskiriantį dujų degimo zonas, projektuoti pasvirusį 195° – 205° kampų (5.4 pav.) (būtinai papildomi tyrimai realioje pakuroje), kad skliauto siena sugertų kuo daugiau šiluminės energijos degimo zonoje ir kad didžioji dalis šiluminės spinduliuotės būtų nukreipta į pakuros džiūvimo zoną).

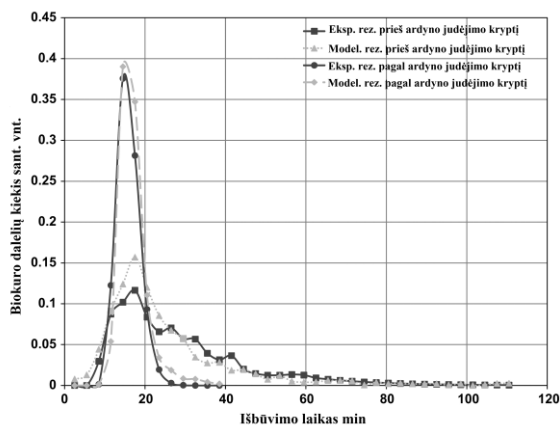


5.4 pav. Biokuro degimas pakuroje ant ardyno (schema modifikuota iš (STRZALKA 2013))

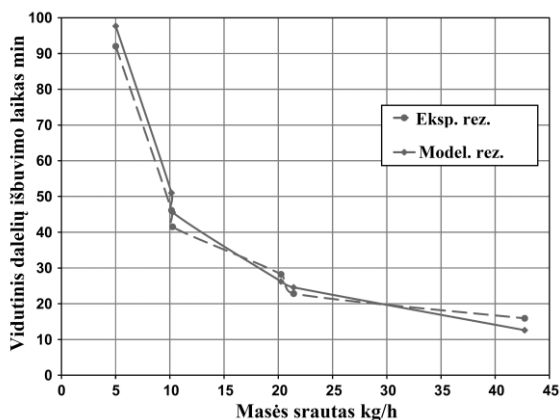
Biokuras pakuroje nuo patekimo į pakurą ant ardyno iki visiško pelenų pašalinimo išbūna apie 30 minučių, o džiovinimo zonoje apie 10 minučių. Siekiant nustatyti išbuvimo ant ardyno laiko įtaką drėgmės išsiskyrimo procesui, pasirinktas 30 minučių eksperimentinių tyrimų laikas. Atlikus tyrimų stacionariame ir nestacionariame smulkintos medienos biokuro sluoksnyje rezultatų analizę nustatyta, kad, norint pasiekti greito savaiminio užsidegimo frontą į pakurą tiekiant labai drėgną (~60 % pagal masę) biokurą, 10-ties minučių kuro išbuvimo džiovinimo zonoje nepakanka. Apžvelgus atliktus pasaulio mokslininkų tyrimus, galime teigti, kad viena iš galimybių galėtų būti ardelių pakreipimo kampo bei judėjimo krypties keitimas. T. y. pakeisti ardyno tipą, kai ardelės juda ta pačia kryptimi kaip ir ardynas į prieš ardyno judėjimo kryptį judančių grotelių konstrukciją (5.5 pav.). Liuksemburgo universiteto mokslininkai (Samiei, Peters 2013) nustatė, kad biokuro dalelės vidutiniškai išbūna maždaug 2 kartus ilgiau judant ardyno ardelėms priešinga ardyno judėjimo kryptimi (5.6 pav.).



5.5 pav. Ardyno tipai priklausomai nuo ardelių judėjimo krypties: pagal ardyno judėjimo kryptį (dešinėje), prieš ardyno judėjimo kryptį (kairėje) (Samie, Peters 2013)



5.6 pav. Biokuro dalelių kiekio pasiskirstymas pagal išbuvimo laiką priklausomai nuo ardyno tipo (Samie, Peters 2013)



5.7 pav. Biokuro dalelių vidutinis išbuvimo laikas priklausomai nuo tiekiamo masės srauto (Samie, Peters 2013)

Atlikus smulkintos medienos biokuro drėgmės išsiskyrimo su integruotu biokuro sluoksnio maišymu tyrimus, nustatyta, kad nepriklausomai nuo tiekiamo iš apačios džiovinimo oro temperatūros bei maišymo periodo dažnumo sluoksnio maišymasis suintensyvina biokuro drėgmės išsiskyrimą 7–17 %, todėl rekomenduojama pakuroje ant ardyno suintensyvinti maišymo procesą. Remdamiesi 2013 metų K. Samiei tyrimų rezultatais (Samiei, Peters 2013), galime teigti, kad priešingai ardyno judėjimo kryptį judančių ardelių konstrukcija indukuoja geresnį biokuro maišymąsi. Tai pat šie mokslininkai nustatė, kad didinat biokuro sluoksnio storį mažėja ardyno tipo įtaka, kadangi viršuje esančios dalelės nesimaišo, o tiesiog slenka sluoksnio paviršiumi (5.7 pav.), todėl rekomenduojama pasirinkti optimalų kuro sluoksnį ant ardyno.

IŠVADOS

Ištyrus degimo procesą lemiančių veiksnių įtaką drėgmės išsiskyrimui iš skirtingų savybių drėgnos (60 ± 5 %) smulkintos medienos sluoksnio imituojant judančios ardyninės pakuros džiovinimo zonoje vykstančius procesus, nustatyta:

1. Didinant pirminio oro temperatūrą nuo $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, smulkintos medienos bandinių drėgmės išsiskyrimo greitis padidėja iki 4,75 karto. Intensyviausias drėgmės išsiskyrimas ($23,2\text{ }\%$ per 30 min) stebėtas džiovinant smulkiausios frakcijos medienos biokuro bandinį su $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros pirminiu oru.
2. Pro ardyno apačią tiekiant skirtingos temperatūros ($50\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$) recirkuliacijos dūmus, biokuro sluoksnyje pasireiškia džiūvimo stagnacijos reiškinys, trunkantis nuo 2,5 iki 12 min. Šio reiškinio metu dėl vandens garų esančių dūmuose kondensacijos drėgmės išsiskyrimo greitis tampa minimalus, o tuo metu išsiskyrusi kondensacijos šiluma yra sunaudojama šaltoms biokuro dalelėms šildyti, o ne vandeniui išgarinti.
3. Tiekiant $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros pirminį orą ir imituojant biokuro sluoksnio paviršiui tenkantį 50 kW/m^2 šiluminį spinduliavimą nuo pakuros įkaitusių paviršių, maksimalus drėgmės kiekio pokytis smulkiausios frakcijos tirtame smulkintos medienos bandinyje po 30 min siekė apie 65 %, kai atitinkamai veikiant tik pirminiu oru – 19,5 %, pirminiu oru ir dūmų recirkuliacijos produktais – 23,2 %. Trumpesniu (10 min) džiūvimo laikotarpiu drėgmės pokytis siekė tik 2–7% veikiant medienos sluoksnį skirtingais, įtaką darančiais veiksniais.
4. Didžiausia maišymo įtaka drėgmės išsiskyrimui buvo džiovinant bandinius $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros pirminiu oru ir esant šiluminiam 50 kW/m^2 spinduliavimui. Maišant smulkintos medienos biokuro įkrovą kas 150 s, drėgmės išsiskyrimo greitis padidėja net 2,1 karto, atitinkamai kas 300 s – 1,8 karto ir kas 600 s – 1,7 karto. Didinant oro temperatūrą iki $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, drėgmės išsiskyrimo greitis sumažėjo ir kito nuo 1,25 iki 1,6 karto priklausomai nuo maišymo dažnio 600 s, 300 s ir 150 s.
5. Pagal gautus tyrimo rezultatus pasiūlytas ir įdiegtas drėgmės kiekio dūmuose skaičiavimo algoritmas 6 MW šiluminės galios pakuros valdyme. Pakuros bandymų metu nustatyta, kad pasitelkus šį algoritmą apskaičiuotos biokuro drėgnio vertės neviršija 2,4 %, lyginant su tiesioginiu metodu išmatuotu biokuro drėgmės kiekiu. Tačiau dėl pakuros inertiškumo, taikant kintamo svertinio vidurkio metodą kuro drėgmės kiekiui prognozuoti, gaunami duomenys vėluotų iki 1 h 9 min 12 s.

LITERATŪRA

1. AHN, Joon and JANG, Jun Hwan, 2018. Combustion characteristics of a 16 step grate-firing wood pellet boiler. *Renewable Energy*. 2018. Vol. 129, pp. 678–685. DOI 10.1016/j.renene.2017.06.015.
2. ANCA-COUCÉ, Andrés, 2016. Reaction mechanisms and multi-scale modelling of lignocellulosic biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1 March 2016. Vol. 53, pp. 41–79. DOI 10.1016/j.pecs.2015.10.002.
3. ANDERSSON, Mats, PERSSON, Linda, SJÖHOLM, Mikael and SVANBERG, Sune, 2006. Spectroscopic studies of wood-drying processes. *Opt. Express*. April 2006. Vol. 14, no. 8, pp. 3641–3653. DOI 10.1364/OE.14.003641
4. ANSELL, Martin P., 2011. Wood - A 45th anniversary review of JMS papers. Part 1: The wood cell wall and mechanical properties. *Journal of Materials Science*. 2011. Vol. 46, no. 23, pp. 7357–7368. DOI 10.1007/s10853-011-5856-2.
5. AULIN, R. and KARLSSON, M., 2008. Standardisation of Moisture Measurement using NIR Spectroscopy for Delivery Control. In: *Värmeforsk rapport*. Stockholm. 2008.
6. AXRUP, Lars, MARKIDES, Karin and NILSSON, Torsten, 2000. Using miniature diode array NIR spectrometers for analysing wood chips and bark samples in motion. *Journal of Chemometrics*. 2000. Vol. 14, no. 5–6, pp. 561–572. DOI 10.1002/1099-128X(200009/12)14:5/6<561::AID-CEM608>3.0.CO;2-2.
7. B. M VAN KESSEL, L, ARENDSSEN, Richard, D. M DE BOER-MEULMAN, P and BREM, Gerrit, 2004. The effect of air preheating on the combustion of solid fuels on a grate.
8. BAK, Jimmy and CLAUSEN, Sønnik, 2001. FTIR emission spectroscopy methods and procedures for real time quantitative gas analysis in industrial environments. *Measurement Science and Technology*. 2001. Vol. 13, no. 2, pp. 150. DOI 10.1088/0957-0233/13/2/302.
9. BARROSO, Gabriel, ROTH, Simon and NUSSBAUMER, Thomas, 2019. Investigation of biomass conversion on a moving grate by pyrolysis gas analysis and fuel bed modelling. *Energy*. 1 May 2019. Vol. 174, pp. 897–910. DOI 10.1016/J.ENERGY.2019.03.002.
10. BAUER, Robert, GO, Markus, BRUNNER, Thomas and DOURDOUMAS, Nicolaos, 2010. Modelling of grate combustion in a medium scale biomass furnace for control purposes. . 2010. Vol. 34, pp. 417–427. DOI 10.1016/j.biombioe.2009.12.005.
11. BENGTTSSON, Peter and CLAESSEN, Johan, 2005. Measurement and modeling of drying for pellet production. *Journal of agricultural Engineering Research*. 2005. pp. 297–305.

12. BENGTTSSON, Peter, 2004. The release of Hydrocarbons from softwood drying: Measurement and modeling. *Maderas. Ciencia y tecnología*. 2004. Vol. 6, no. 2. DOI 10.4067/S0718-221X2004000200002.
13. BENGTTSSON, Peter, 2015. Experimental Analysis of Low-Temperature Bed Drying of Wooden Biomass Particles. *Drying Technology*. 2015. Vol. 3937, no. December. DOI 10.1080/07373930801946726.
14. BERMÚDEZ, César A., PORTEIRO, Jacobo, VARELA, Luis G., CHAPELA, Sergio and PATIÑO, David, 2020. Three-dimensional CFD simulation of a large-scale grate-fired biomass furnace. *Fuel Processing Technology*. 1 February 2020. Vol. 198, pp. 106219. DOI 10.1016/J.FUPROC.2019.106219.
15. BLIJDERVEEN, Maarten van, GUCHO, Eyerusalem M, BRAMER, Eddy A and BREM, Gerrit, 2010. Spontaneous ignition of wood , char and RDF in a lab scale packed bed. *Fuel*. Online. 2010. Vol. 89, no. 9, pp. 2393–2404. DOI 10.1016/j.fuel.2010.01.021.
16. BOLSHOV, M. A., KURITSYN, Yu A. and ROMANOVSKII, Yu V., 2015. Tunable diode laser spectroscopy as a technique for combustion diagnostics. . 2015. ISBN 0584-8547.
17. BOONSTRA, M. J. and BLOMBERG, J., 2007. Semi-isostatic densification of heat-treated radiata pine. *Wood Science and Technology*. 2007. Vol. 41, no. 7, pp. 607–617. DOI 10.1007/s00226-007-0140-y.
18. BRANDT, Björn, ZOLLFRANK, Cordt, FRANKE, Oliver, FROMM, Jörg, GÖKEN, Mathias and DURST, Karsten, 2010. Micromechanics and ultrastructure of pyrolysed softwood cell walls. *Acta Biomaterialia*. 2010. DOI 10.1016/j.actbio.2010.05.026.
19. BUCHMAYR, M., GRUBER, J., HARGASSNER, M. and HOCHENAUER, C., 2015. Experimental investigation of the primary combustion zone during staged combustion of wood-chips in a commercial small-scale boiler. *Biomass and Bioenergy*. 2015. Vol. 81, pp. 356–363. DOI 10.1016/j.biombioe.2015.07.016.
20. BUKHARKIN, E.N., 1997. Conditions ensuring reliable service of stack-gas paths in boiler houses using condensing economizers. *Thermal engineering*. 1997. Vol. 44, no. 9, pp. 724–729.
21. CAPOSCIUTTI, Gianluca and ANTONELLI, Marco, 2018. Experimental investigation on air displacement and air excess effect on CO, CO2 and NOx emissions of a small size fixed bed biomass boiler. *Renewable Energy*. 2018. Vol. 116, no. x, pp. 795–804. DOI 10.1016/j.renene.2017.10.001.
22. CHAN, Clement Matthew, VANDI, Luigi Jules, PRATT, Steven, HALLEY, Peter, RICHARDSON, Desmond, WERKER, Alan and LAYCOCK, Bronwyn, 2018. Composites of Wood and Biodegradable

- Thermoplastics: A Review. *Polymer Reviews*. Online. 2018. Vol. 58, no. 3, pp. 444–494. DOI 10.1080/15583724.2017.1380039.
23. COLLAZO, J., PORTEIRO, J., PATIÑO, D. and GRANADA, E., 2012. Numerical modeling of the combustion of densified wood under fixed-bed conditions. *Fuel*. 1 March 2012. Vol. 93, pp. 149–159. DOI 10.1016/J.FUEL.2011.09.044.
 24. CSERTA, Erzsebet, 2012. Drying Process of Wood Using Infrared Radiation. Thesis. 2012. pp. 92.
 25. DAASSI-GNABA, Hela, OUSSAR, Yacine, MERLAN, Maria, DITCHI, Thierry, GÉRON, Emmanuel and HOLÉ, Stéphane, 2017. Wood moisture content prediction using feature selection techniques and a kernel method. *Neurocomputing*. 2017. Vol. 237, pp. 79–91. DOI 10.1016/j.neucom.2016.09.005.
 26. DAHLQUIST, Erik, 2013. Biomass as Energy Source: Resources, Systems and Applications. CRC Press. ISBN 0415620872.
 27. DANIELSSON, Susanne and RASMUSON, Anders, 2002. The influence of drying medium, temperature, and time on the release of monoterpenes during convective drying of wood chips. *Drying Technology*. July 2002. Vol. 20, no. 7, pp. 1427–1444. DOI 10.1081/DRT-120005860.
 28. DAUD, Wan Ramli Wan, 2008. Fluidized Bed Dryers — Recent Advances. *Advanced Powder Technology*. January 2008. Vol. 19, no. 5, pp. 403–418. DOI 10.1016/S0921-8831(08)60909-7.
 29. DEBONI, Tamires Liza, SIMIONI, Flávio José, ROSÁRIO, Jeane de Almeida do and COSTA, Valdeci José, 2020. Quality of biomass from old wood waste deposits in Southern Brazil. *Biomass and Bioenergy*. 1 December 2020. Vol. 143, pp. 105841. DOI 10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105841.
 30. Erzsebet Cserta, Drying Process of Wood Using Infrared Radiation, The József Cziráki Doctoral School of Wood Sciences and Technologies, 2012.
 31. DUFFY, Neil, 2012. Investigation of Biomass Combustion in Grate Furnaces using CFD. 02.03.01_CombustionBiomass. 2012. No. December.
 32. EUROPEAN BIOMASS ASSOCIATION, 2017. AEBIOM STATISTICAL REPORT 2017 European Bioenergy Outlook. Prieiga per: <https://www.forest2market.com/blog/european-biomass-association-publishes-2017-statistical-report>
 33. FARAVELLI, T, FRASSOLDATI, Alessio, MIGLIAVACCA, Gabriele and RANZI, Eliseo, 2010. Detailed kinetic modeling of the thermal degradation of lignins.
 34. GARBACZ, Przemysław and WEJKOWSKI, Robert, 2020. Numerical research on the SNCR method in a grate boiler equipped with the innovative FJBS system. *Energy*. 15 September 2020. Vol. 207, pp. 118240. DOI 10.1016/J.ENERGY.2020.118240.

35. GARDNER, K. H. and BLACKWELL, J., 1974. The structure of native cellulose. *Biopolymers*. 1974. DOI 10.1002/bip.1974.360131005.
36. GINDL, Wolfgang, TEISCHINGER, Alfred, SCHWANNINGER, Manfred and HINTERSTOISSER, Barbara, 2001. The Relationship between near Infrared Spectra of Radial Wood Surfaces and Wood Mechanical Properties. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 1 October 2001. Vol. 9, no. 4, pp. 255–261. DOI 10.1255/jnirs.311.
37. GORT, R. and BROUWERS, J. J.H., 2001. Theoretical analysis of the propagation of a reaction front in a packed bed. *Combustion and Flame*. 2001. Vol. 124, no. 1–2, pp. 1–13. DOI 10.1016/S0010-2180(00)00149-8.
38. GRANSTRÖM, Karin and JAVEED, Atif, 2016. Emissions from sawdust in packed moving bed dryers and subsequent pellet production. *LDRT*. Online. 2016. Vol. 34, no. 3, pp. 258–266. DOI 10.1080/07373937.2015.1043555.
39. GREEN, D, WINANDY, J and KRETSCHMANN, D, 1999. Mechanical properties of wood.
40. GUO, Feiqiang, DONG, Yuping, DONG, Lei and GUO, Chenlong, 2014. Effect of design and operating parameters on the gasification process of biomass in a downdraft fixed bed: An experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*. 4 April 2014. Vol. 39, no. 11, pp. 5625–5633. DOI 10.1016/J.IJHYDENE.2014.01.130.
41. HAQUE, M. Nawshadul, 2002. Modelling of Solar Kilns and the Development of Anoptimised Schedule for Drying Hardwood Timber. Ph.D. thesis. 2002. No. March 2002, pp. 380.
42. HARTMANN, Hans, BO, Thorsten and DAUGBJERG, Peter, 2006. Methods for size classification of wood chips. . 2006. Vol. 30, pp. 944–953. DOI 10.1016/j.biombioe.2006.06.010.
43. HERMANSSON, Sven, LIND, Fredrik and THUNMAN, Henrik, 2011b. On-line monitoring of fuel moisture-content in biomass-fired furnaces by measuring relative humidity of the flue gases. *Chemical Engineering Research and Design*. 2011. Vol. 89, no. 11, pp. 2470–2476. DOI 10.1016/j.cherd.2011.03.018.
44. HOLMBERG, Henrik, AHTILA, Pekka and AHTILA, Olli, 2011. Experimental Study on Drying of Bark in Fixed Beds. *Drying Technology*. June 2011. Vol. 29, no. 8, pp. 953–960. DOI 10.1080/07373937.2010.551305.
45. HOOGWILK, Monique, FAAIJ, André, VAN DEN BROEK, Richard, BERNDES, Göran, GIELEN, Dolf and TURKENBURG, Wim, 2003. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. *Biomass and Bioenergy*. 2003. Vol. 25, no. 2, pp. 119–133. DOI 10.1016/S0961-9534(02)00191-5.
46. HOUSHANG, Amir, BESSERON, Xavier, HOFFMANN, Florian, MARKOVIC, Miladin and PETERS, Bernhard, 2016. Modeling of the biomass combustion on a forward acting grate using XDEM. *Chemical*

- Engineering Science. 2016. Vol. 142, pp. 32–41. DOI 10.1016/j.ces.2015.11.015.
47. HUTTUNEN, Marcus, HOLMBERG, André and STENSTRÖM, Stig, 2017. Modeling fixed-bed drying of bark. . 2017. Vol. 3937. DOI 10.1080/07373937.2016.1161645.
48. IKONEN, S., STORMBOM, L. and RANTA-AHO, T., 2006. Chemical interference test results of a novel humidity sensor. In: 5th International Symposium on Humidity and Moisture. Rio de Janeiro. 2006.
49. JAAKKOLA, Petri T., VAHLMAN, Tuula A., ROOS, Aappo A., SAARINEN, Pekka E. and KAUPPINEN, Jyrki K., 1998. On-line analysis of stack gas composition by a low resolution FT-IR gas analyzer. Water, Air, and Soil Pollution. 1998. Vol. 101, no. 1–4, pp. 79–92. DOI 10.1023/A:1004905521433.
50. JOHANSSON, Anders and RASMUSON, Anders, 2017. The release of monoterpenes during convective drying of wood chips. . 2017. Vol. 3937, no. March. DOI 10.1080/07373939808917467.
51. JOHANSSON, R., THUNMAN, H. and LECKNER, B., 2007. Influence of intraparticle gradients in modeling of fixed bed combustion. Combustion and Flame. 2007. Vol. 149, no. 1–2, pp. 49–62. DOI 10.1016/j.combustflame.2006.12.009.
52. JOSEPH E.L. ROGERS, 1973. Solid Fuel Combustion and its Application to the Incineration of Solid Refuse. Massachusetts institute of technology.
53. KÆR, Søren K., 2004. Numerical modelling of a straw-fired grate boiler. Fuel. 2004. Vol. 83, no. 9, pp. 1183–1190. DOI 10.1016/j.fuel.2003.12.003.
54. KIENER, Martin and NUSSBAUMER, T, 2012. Influence of uneven fuel distribution on a grate on gas flow conditions and combustion quality. Proceedings of the 20th European biomass conference and exhibition, 2012 Jun 18–22, Milano, Italy. 2012. pp. 761–767.
55. KORTELA, J. and JÄMSÄ-JOUNELA, S. L., 2013. Fuel moisture soft-sensor and its validation for the industrial BioPower 5 CHP plant. Applied Energy. 2013. Vol. 105, pp. 66–74. DOI 10.1016/j.apenergy.2012.12.049.
56. KULASINSKI, Karol, 2015. Physical and Mechanical Aspects of Moisture Adsorption in Wood Biopolymers Investigated with Atomistic Simulations.
57. LACKNER, Maximilian, 2007. Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) in the Process Industries – a Review. Reviews in Chemical Engineering. 2007. Vol. 23, pp. 65–147. DOI 10.1515/REVCE.2007.23.2.65.
58. LESTANDER, Torbjörn a and RHÉN, Christofer, 2005. Multivariate NIR spectroscopy models for moisture, ash and calorific content in biofuels using bi-orthogonal partial least squares regression. The Analyst. 2005. Vol. 130, no. 8, pp. 1182–9. DOI 10.1039/b500103j.

59. LEVAN, Susan L and JERROLD. E., Winandy, 1990. Effects of fire-retardant treatments on wood strength: a review. *Wood and Fiber Science*. 1990. Vol. 22, no. 1, pp. 113–131.
60. LI, Fenghai, LI, Yang, FAN, Hongli, WANG, Tao, GUO, Mingxi and FANG, Yitian, 2019. Investigation on fusion characteristics of deposition from biomass vibrating grate furnace combustion and its modification. *Energy*. 2019. Vol. 174, pp. 724–734. DOI 10.1016/j.energy.2019.02.154.
61. LI, H, CHEN, Q, ZHANG, X and FINNEY, Kn, 2012. Evaluation of a biomass drying process using waste heat from process industries: A case study. *Applied Thermal Engineering*. 2012. Vol. 35, pp. 71–80. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2011.10.009.
62. LIANG, Ligang, SUN, Rui, FEI, Jun, WU, Shaohua, LIU, Xiang, DAI, Kui and YAO, Na, 2008. Experimental study on effects of moisture content on combustion characteristics of simulated municipal solid wastes in a fixed bed. *Bioresource Technology*. 1 October 2008. Vol. 99, no. 15, pp. 7238–7246. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2007.12.061.
63. LIU, Yuping, PENG, Jianghong, KANSHA, Yasuki, ISHIZUKA, Masanori, TSUTSUMI, Atsushi, JIA, Dening, T. BI, Xiaotao, LIM, Jim and SOKHANSANJ, Shahab, 2014. Novel fluidized bed dryer for biomass drying.
64. LUNDBERG, Louise, SORIA-VERDUGO, Antonio, PALLARÈS, David, JOHANSSON, Robert and THUNMAN, Henrik, 2017. The role of fuel mixing on char conversion in a fluidized bed. *Powder Technology*. 2017. Vol. 316, pp. 677–686. DOI 10.1016/j.powtec.2016.10.060.
65. LYND, Lee R, WEIMER, Paul J, ZYL, Willem H Van and PRETORIUS, Isak S, 2002. Microbial cellulosa utilization: Fundamentals and Biotechnology. *Bioresource Technology*. 2002. Vol. 66, no. 3, pp. 506–577. DOI 10.1128/MMBR.66.3.506.
66. MAHMOUDI, Amir Houshang, BESSERON, Xavier, HOFFMANN, Florian, MARKOVIC, Miladin and PETERS, Bernhard, 2016. Modeling of the biomass combustion on a forward acting grate using XDEM. *Chemical Engineering Science*. 13 March 2016. Vol. 142, pp. 32–41. DOI 10.1016/J.CES.2015.11.015.
67. MANSFIELD, Shawn D., PARISH, Roberta, OTT, Peter K., HART, James F. and GOUDIE, James W., 2016. Assessing the wood quality of interior spruce (*Picea glauca* × *P. engelmannii*): Variation in strength, relative density, microfibril angle, and fiber length. *Holzforschung*. 2016. Vol. 70, no. 3, pp. 223–234. DOI 10.1515/hf-2015-0008.
68. MARKOVIC, Miladin, BRAMER, Eddy A and BREM, Gerrit, 2014. Experimental investigation of wood combustion in a fixed bed with hot air. *Waste Management*. Online. 2014. Vol. 34, no. 1, pp. 49–62. DOI 10.1016/j.wasman.2013.09.021.

69. MARTINEZ-GARCIA, Jorge, NUSSBAUMER, Thomas, Jorge and NUSSBAUMER, Thomas, 2015. A One-Dimensional Transient Solid Fuel Conversion Model for Grate Combustion Optimization CONVERSION MODEL FOR GRATE COMBUSTION. *Combustion Science and Technology*. Online. 2015. Vol. 187, no. 8, pp. 1208–1228. DOI 10.1080/00102202.2015.1027819.
70. MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*. 2002. Vol. 83, no. July 2001, pp. 37–46. ISBN 0960-8524. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
71. MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 2): Overview of biomass. *Bioresource Technology*. 2002. Vol. 83, no. July 2001, pp. 47–54. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)
72. MEHROTRA, Ranjana, SINGH, Parul and KANDPAL, H C, 2010. Near infrared spectroscopic investigation of the thermal degradation of wood.
73. MENG, Xiaoxiao, ISMAIL, Tamer M., ZHOU, Wei, YAN, Yonghong, REN, Xiaohan, SUN, Rui and ABD EL-SALAM, M., 2021. Numerical study of preheating primary air on pinewood and corn straw co-combustion in a fixed bed using Eulerian-Eulerian approach. *Fuel*. 1 April 2021. Vol. 289, pp. 119455. DOI 10.1016/J.FUEL.2020.119455.
74. MENG, Xiaoxiao, SUN, Rui, ISMAIL, Tamer M., ZHOU, Wei, REN, Xiaohan and ZHANG, Ruihan, 2017. Parametric studies on corn combustion characteristics in a fixed bed: Primary air flow rate and different corn lengths. *Applied Thermal Engineering*. 5 November 2017. Vol. 126, pp. 702–716. DOI 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.07.197.
75. MENG, Xiaoxiao, SUN, Rui, ISMAIL, Tamer M., ZHOU, Wei, REN, Xiaohan and ZHANG, Ruihan, 2018. Parametric studies on corn straw combustion characteristics in a fixed bed: Ash and moisture content. *Energy*. 1 September 2018. Vol. 158, pp. 192–203. DOI 10.1016/J.ENERGY.2018.06.060.
76. MERLAN, Maria. Study and realization of a microwaves system to estimate the moisture content in wood biomass. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2016.
77. MYLLYMAA, Tiina, HOLMBERG, Henrik, HILLAMO, Harri, LAAJALEHTO, Tatu and AHTILA, Pekka, 2015. Wood Chip Drying in Fixed Beds: Drying Kinetics and Economics of Drying at a Municipal Combined Heat and Power Plant Site. *Drying Technology*. January 2015. Vol. 33, no. 2, pp. 205–215. DOI 10.1080/07373937.2014.945179.
78. NEONILA, Semashko and ZIBTSEV, Sergiy, 2010. Swedish University of Agricultural Sciences. Writing. 2010. Vol. 26, no. 2014, pp. 17–20.

79. NIEDERMAYR, F, WAID, S, AUÑÓN, D García, RIEDL, M and MATT, D, 2015. Design of a scalable and robust woodchip handling control system. SDEWES 2015. 2015. Vol. 2015–1012, pp. 1–9.
80. NUSSBAUMER, Thomas, 2003. Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. Energy and Fuels. 2003. Vol. 17, no. 6, pp. 1510–1521. DOI 10.1021/ef030031q.
81. NYSTRÖM, J. and DAHLQUIST, E., 2004. Methods for determination of moisture content in woodchips for power plants - A review. . 2004. ISBN 0016-2361.
82. P. BASU, 2010. Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory, Elsevier Inc. ISBN 9780080878737.
83. PACES, N. and KOZEK, M., 2011. Modeling of a grate-firing biomass furnace for real-time application. IMCIC 2011 - 2nd International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics, Proceedings. 2011. Vol. 1, no. April.
84. PANG, Shusheng and MUJUMDAR, Arun S., 2010. Drying of Woody Biomass for Bioenergy: Drying Technologies and Optimization for an Integrated Bioenergy Plant. Drying Technology. May 2010. Vol. 28, no. 5, pp. 690–701. DOI 10.1080/07373931003799236.
85. PAULAUŠKAS, Rolandas. Pirolizės metu atsirandančių granuliuotos biomasės terminių deformacijų tyrimas. Daktaro disertacija. 2017. ISBN978-609-02-1301-8. pp. 85.
86. PÉREZ, Juan F., MELGAR, Andrés and BENJUMEA, Pedro Nel, 2012. Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study. Fuel. 1 June 2012. Vol. 96, pp. 487–496. DOI 10.1016/J.FUEL.2012.01.064.
87. PORTEIRO, J., PATIÑO, D., COLLAZO, J., GRANADA, E., MORAN, J. and MIGUEZ, J. L., 2010. Experimental analysis of the ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor. Fuel. 1 January 2010. Vol. 89, no. 1, pp. 26–35. DOI 10.1016/J.FUEL.2009.01.024.
88. PROKKOLA, Hanna, KUOKKANEN, Matti, KUOKKANEN, Toivo and LASSI, Ulla, 2014. Chemical Study of Wood Chip Drying: Biodegradation of Organic Pollutants in Condensate Waters from the Drying Process. . 2014. Vol. 9, no. Bengtsson 2004, pp. 3761–3778.
89. RADOTIĆ, Ksenija, KALAUZI, Aleksandar, DJIKANović, Daniela, JEREMIĆ, Milorad, LEBLANC, Roger M. and CEROVIĆ, Zoran G., 2006. Component analysis of the fluorescence spectra of a lignin model compound. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 1 May 2006. Vol. 83, no. 1, pp. 1–10. DOI 10.1016/j.jphotobiol.2005.12.001.
90. RAO, M. S., SINGH, S. P., SODHA, M. S., DUBEY, A. K. and SHYAM, M., 2004. Stoichiometric, mass, energy and exergy balance

- analysis of countercurrent fixed-bed gasification of post-consumer residues. *Biomass and Bioenergy*. 2004. Vol. 27, no. 2, pp. 155–171. DOI 10.1016/j.biombioe.2003.11.003.
91. RAZMJOO, Narges, SEFIDARI, Hamid and STRAND, Michael. Characterization of hot gas in a 4 MW reciprocating grate boiler. *Fuel Processing Technology*. 2014. Vol. 124, pp. 21–27. DOI 10.1016/j.fuproc.2014.02.011.
 92. RAZMJOO, Narges, SEFIDARI, Hamid and STRAND, Michael. Measurements of temperature and gas composition within the burning bed of wet woody residues in a 4 MW moving grate boiler. *Fuel Processing Technology*. 2016. Vol. 152, pp. 438–445. DOI 10.1016/j.fuproc.2016.07.011.
 93. RÉMOND, R., PASSARD, J. and PERRÉ, P., 2007. The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood: a comprehensive model applied to drying and bending. *European Journal of Mechanics, A/Solids*. 2007. Vol. 26, no. 3, pp. 558–572. DOI 10.1016/j.euromechsol.2006.09.008.
 94. REZAEI, Hamid, LIM, C Jim, LAU, Anthony, BI, Xiaotao and SOKHANSANJ, Shahab, 2016. Development of Empirical Drying Correlations for Ground Wood Chip and Ground Wood Pellet Particles. . 2016. Vol. 3937, no. DOI 10.1080/07373937.2016.1198912.
 95. ROSS, Robert J. and USDA FOREST SERVICE., Forest Products Laboratory., 2010. Wood handbook : wood as an engineering material. . 2010. DOI 10.2737/FPL-GTR-190.
 96. ROWELL, Roger, 2005. Handbook Of Wood Chemistry And Wood Composites. ISBN 9780849315886.
 97. RYU, Changkook, BIN, Yao, KHOR, Adela, YATES, Nicola E, SHARIFI, Vida N and SWITENBANK, Jim, 2006. Effect of fuel properties on biomass combustion : Part I . Experiments — fuel type , equivalence ratio and particle size. . 2006. Vol. 85, pp. 1039–1046. DOI 10.1016/j.fuel.2005.09.019.
 98. SAASTAMOINEN, J. J., TAIPALE, R., HORTTANAINEN, M. and SARKOMAA, P., 2000. Propagation of the ignition front in beds of wood particles. *Combustion and Flame*. 1 October 2000. Vol. 123, no. 1–2, pp. 214–226. DOI 10.1016/S0010-2180(00)00144-9.
 99. SABELSTRÖM, H, 2007. Diffusion of Solid Fuel on a Vibrating Grate. Institute of Energy Technology, Aalborg University.
 100. SAI, P. S. T., 2013. Drying of Solids in a Rotary Dryer. *Drying Technology*. January 2013. Vol. 31, no. 2, pp. 213–223. DOI 10.1080/07373937.2012.711406.
 101. SAMIEI, K and PETERS, B, 2013. Experimental and numerical investigation into the residence time distribution of granular particles on forward and reverse acting grates. *Chemical Engineering Science*. 2013. Vol. 87, pp. 234–245. DOI 10.1016/j.ces.2012.09.027.

102. SEFIDARI, Hamid, RAZMJOO, Narges and STRAND, Michael, 2014. An experimental study of combustion and emissions of two types of woody biomass in a 12-MW reciprocating-grate boiler. *Fuel*. 2014. Vol. 135, pp. 120–129. DOI 10.1016/j.fuel.2014.06.051.
103. SHAH, Imran Ali, GOU, Xiang, ZHANG, Qiyan, WU, Jinxiang, WANG, Enyu and LIU, Yingfan, 2018. Experimental study on NOx emission characteristics of oxy-biomass combustion. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 199, no. x, pp. 400–410. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.07.022.
104. SHEIKHOLESAMI, Roya and WATKINSON, A P, 1992. Convective drying of wood-waste in air and superheated steam. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. Online. 1 June 1992. Vol. 70, no. 3, pp. 470–481. DOI 10.1002/cjce.5450700309.
105. SILVA, João, FERREIRA, Ana Cristina, TEIXEIRA, Senhorinha, MARTINS, Luís, FERREIRA, Eduardo and TEIXEIRA, José Carlos, 2021. Sawdust drying process in a large-scale pellets facility: An energy and exergy analysis. *Cleaner Environmental Systems*. 1 June 2021. Vol. 2, pp. 100037. DOI 10.1016/J.CESYS.2021.100037.
106. SIMONEIT, Bernd R.T., 1999. A review of biomarker compounds as source indicators and tracers for air pollution. *Environmental Science and Pollution Research*. 1 February 1999. Vol. 6, no. 3, pp. 159–169. DOI 10.1007/BF02987621.
107. STENSTRÖM, Stig, 2017a. Drying of Biofuels From the Forest — A Review. . 2017. Vol. 3937, no. March. DOI 10.1080/07373937.2016.1258571.
108. STRZALKA Rafal, et al. Analysis and optimization of a cogeneration system based on biomass combustion. *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 50, Issue 2, pp 1418-1426. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.039>.
109. STOKKE, Douglas D., WU, Qinglin and HAN, Guangping, 2013. Introduction to wood and natural fiber composites. ISBN 9780470711804.
110. SVOBODA, Karel, MARTINEC, Jiří, POHOVRELÝ, Michael and BAXTER, David, 2009. Integration of biomass drying with combustion/gasification technologies and minimization of emissions of organic compounds. *Chemical Papers*. 2009. Vol. 63, no. 1, pp. 15–25. DOI 10.2478/s11696-008-0080-5.
111. THUNMAN, H. and LECKNER, B., 2001. Ignition and propagation of a reaction front in cross-current bed combustion of wet biofuels. *Fuel*. Online. 1 March 2001. Vol. 80, no. 4, pp. 473–481. [Accessed 17 June 2019]. DOI 10.1016/S0016-2361(00)00127-7.
112. THUNMAN, Henrik and LECKNER, Bo, 2003. Co-current and counter-current fixed bed combustion of biofuel - A comparison. *Fuel*. 2003. Vol. 82, no. 3, pp. 275–283. DOI 10.1016/S0016-2361(02)00289-2.

113. THUNMAN, Henrik and LECKNER, Bo, 2005. Influence of size and density of fuel on combustion in a packed bed. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2005. Vol. 30, no. 2, pp. 2939–2946. DOI <https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.07.010>.
114. TRABELSI, Samir, PAZ, Ana M. and NELSON, Stuart O., 2013. Microwave dielectric method for the rapid, non-destructive determination of bulk density and moisture content of peanut hull pellets. *Biosystems Engineering*. 2013. Vol. 115, no. 3, pp. 332–338. DOI [10.1016/j.biosystemseng.2013.04.003](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.04.003).
115. TROCCIA, Nello, 2014. Woody biomass combustion modeling in moving grate furnaces. Thesis. 2014. No. June, pp. 99.
116. TSUCHIKAWA, Satoru, 2007. A Review of Recent Near Infrared Research for Wood and Paper. *Applied Spectroscopy Reviews*. 2007. Vol. 42, no. 1, pp. 43–71. DOI [10.1080/05704920601036707](https://doi.org/10.1080/05704920601036707).
117. VAN BLIJDERVEEN, Maarten, BRAMER, Eddy A. and BREM, Gerrit, 2013. Modelling spontaneous ignition of wood, char and RDF in a lab-scale packed bed. *Fuel*. 1 June 2013. Vol. 108, pp. 190–196. DOI [10.1016/J.FUEL.2013.01.040](https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2013.01.040).
118. VAN KUIJK, H. A.J.A., BASTIAANS, R. J.M., VAN OIJEN, J. A. and DE GOEY, L. P.H., 2008. Grate furnace combustion: A submodel for the solid fuel layer. *International Journal for Multiscale Computational Engineering*. 2008. Vol. 6, no. 1, pp. 103–111. DOI [10.1615/IntJMultCompEng.v6.i1.90](https://doi.org/10.1615/IntJMultCompEng.v6.i1.90).
119. VAN LOO, S and KOPPEJAN, J, 2012. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Online. Taylor & Francis Group. ISBN 9781849773041.
120. STRIŪGAS, N. Vorotinskiene, L. Paulauskas, R. Navakas, R. and Džiugys, A. Narbutas, L. 2017. Estimating the fuel moisture content to control the reciprocating grate furnace firing wet woody biomass. . 2017. Vol. 149, pp. 937–949. DOI [10.1016/j.enconman.2017.04.014](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.014).
121. WAHLUND, Bertil, YAN, Jinyue and WESTERMARK, Mats, 2004. Increasing biomass utilisation in energy systems: A comparative study of CO₂ reduction and cost for different bioenergy processing options. *Biomass and Bioenergy*. 2004. Vol. 26, no. 6, pp. 531–544. DOI [10.1016/j.biombioe.2003.09.003](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.09.003).
122. WANG, Shurong, DAI, Gongxin, YANG, Haiping and LUO, Zhongyang, 2017. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1 September 2017. Vol. 62, pp. 33–86. DOI [10.1016/J.PECS.2017.05.004](https://doi.org/10.1016/J.PECS.2017.05.004).
123. WIHERSAARI, Margareta, 2005. Greenhouse gas emissions from final harvest fuel chip production in Finland. *Biomass and Bioenergy*. 2005. Vol. 28, no. 5, pp. 435–443. DOI [10.1016/j.biombioe.2004.11.007](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.007).
124. WIINIKKA, Henrik, GEBART, Rikard, BOMAN, Christoffer, BOSTRÖM, Dan and ÖHMAN, Marcus, 2007. Influence of fuel ash

- composition on high temperature aerosol formation in fixed bed combustion of woody biomass pellets. *Fuel*. 1 January 2007. Vol. 86, no. 1–2, pp. 181–193. DOI 10.1016/J.FUEL.2006.07.001.
125. WIKBERG, Hanne and MAUNU, Sirkka Liisa, 2004. Characterisation of thermally modified hard- And softwoods by ¹³C CPMAS NMR. *Carbohydrate Polymers*. 2004. Vol. 58, no. 4, pp. 461–466. DOI 10.1016/j.carbpol.2004.08.008.
 126. WILLIAMS, A., JONES, J. M., MA, L. and POURKASHANIAN, M., 2012. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. . 2012. ISBN 0360-1285.
 127. WIMMERSTEDT, Roland, 1999. Recent advances in biofuel drying. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. September 1999. Vol. 38, no. 4–6, pp. 441–447. DOI 10.1016/S0255-2701(99)00041-0.
 128. YAMAMOTO, H., 2002. Origin of the Biomechanical Properties of Wood Related to the Fine Structure of the Multi-layered Cell Wall. *Journal of Biomechanical Engineering*. 2002. Vol. 124, no. 4, pp. 432. DOI 10.1115/1.1485751.
 129. YANG, Yao Bin, SHARIFI, Vida N. and SWITENBANK, Jim, 2007. Converting moving-grate incineration from combustion to gasification - Numerical simulation of the burning characteristics. *Waste Management*. 2007. Vol. 27, no. 5, pp. 645–655. DOI 10.1016/j.wasman.2006.03.014.
 130. YANG, Y B, SHARIFI, V N and SWITENBANK, J, 2004. Effect of air flow rate and fuel moisture on the burning behaviours of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds. . 2004. Vol. 83, no. x, pp. 1553–1562. DOI 10.1016/j.fuel.2004.01.016.
 131. YILDIZ, Sibel and GÜMÜŞKAYA, Esat, 2007. The effects of thermal modification on crystalline structure of cellulose in soft and hardwood. *Building and Environment*. 2007. Vol. 42, no. 1, pp. 62–67. DOI 10.1016/j.buildenv.2005.07.009.
 132. YIN, Chungen, ROSENDAHL, Lasse A. and KÆR, Søren K., 2008. Grate-firing of biomass for heat and power production. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008. Vol. 34, no. 6, pp. 725–754. DOI 10.1016/j.pecs.2008.05.002.
 133. YOUNSI, R., KOCAEFE, D., PONCSAK, S. and KOCAEFE, Y., 2007. Computational modelling of heat and mass transfer during the high-temperature heat treatment of wood. *Applied Thermal Engineering*. 2007. Vol. 27, no. 8–9, pp. 1424–1431. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2006.10.025.
 134. ZADRAVEC, Tomas, YIN, Chungen, KOKALJ, Filip, SAMEC, Niko and RAJH, Boštjan, 2020. The impacts of different profiles of the grate inlet conditions on freeboard CFD in a waste wood-fired grate boiler. *Applied Energy*. 15 June 2020. Vol. 268, pp. 115055. DOI 10.1016/J.APENERGY.2020.115055.

135. ZHANG, Linghong, XU, Chunbao (Charles) and CHAMPAGNE, Pascale, 2010. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*. 2010. Vol. 51, no. 5, pp. 969–982. DOI 10.1016/j.enconman.2009.11.038.
136. ZHAO, Nan, LI, Bowen, AHMAD, Riaz, DING, Fan, ZHOU, Yuguang, LI, Gang, ZAYAN, Ali Mohammed Ibrahim and DONG, Renjie, 2021. Dynamic relationships between real-time fuel moisture content and combustion-emission-performance characteristics of wood pellets in a top-lit updraft cookstove. *Case Studies in Thermal Engineering*. 1 December 2021. Vol. 28, pp. 101484. DOI 10.1016/J.CSITE.2021.101484.
137. ZHOU, Anqi, XU, Hongpeng, MENG, Xiaoxiao, YANG, Wenming and SUN, Rui, 2021. Development of a numerical model for co-combustion of the blended solid waste fuel in the grate boiler. *Chemical Engineering Journal*. 1 February 2021. Vol. 405, pp. 126604. DOI 10.1016/J.CEJ.2020.126604.
138. ZWIENIECKI, Maciej Andrzej and HOLBROOK, Noel Michele, 2000. Bordered Pit Structure and Vessel Wall Surface Properties. Implications for Embolism Repair. *Plant Physiology*. 2000. Vol. 123, no. 3, pp. 1015–1020. DOI 10.1104/pp.123.3.1015.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Straipsniai „Thomson Reuters“ duomenų bazėje „Web of Science Core Collection“ referuojamuose žurnaluose

1. Striūgas N., Vorotinskienė L., Paulauskas R., Navakas R., Džiugys A., Narbutas L. Estimating the fuel moisture content to control the reciprocating grate furnace firing wet woody biomass. *Energy Conversion and Management*. 2017, Vol. 149, p. 937-949. ISSN 0196-8904.
2. Vorotinskienė L., Paulauskas R., Zakarauskas K., Navakas R., Skvorčinskienė R., Striūgas N. Parameters influencing wet biofuel drying during combustion in grate furnaces. *Fuel*. Oxford: Elsevier. 2020, Vol. 265, 117013, p. 1-10. ISSN 0016-2361.

Straipsniai mokslo leidiniuose, registruotuose tarptautinėse mokslinės informacijos duomenų bazėse

1. Vorotinskienė L. Parameters affecting biomass drying during combustion in moving grate furnaces In: *Energetika*. Vilnius: Lithuanian Academy of Sciences, 2019, Vol. 65, No. 1, p. 71-84. ISSN 0235-7208.

Tarptautinių konferencijų pranešimų medžiagoje paskelbti straipsniai

1. Striūgas N., Vorotinskienė L., Džiugys A., Paulauskas R., Navakas R., Narbutas L. Optimization of automated operation of biomass furnace firing wood chips with varying properties by experimental validation of moisture prediction method //11th Conference on sustainable development of energy, water and environment systems (SDEWES 2016). September 4-9 2016 Lisbon, Portugal. ISSN 1847-7178
2. Vorotinskienė L., Striūgas N. Investigation of the biofuel drying intensification by experiments imitating the furnace operational processes // The 14th International Conference of Young Scientists on energy Issues (CYSENI 2017), Kaunas, Lithuania, May 25-26, 2017. Kaunas: LEI, 2017, ISSN 1822-7554. p. 277-286
3. Vorotinskienė L., Striūgas N. Investigation of processes in a grate furnace to intensify biofuel drying // The 15th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI 2018) Kaunas, Lithuania, May 23-25, 2018. Kaunas: LEI, 2018, ISSN 1822-7554. p. 142-149
4. Vorotinskienė L., Striūgas N., Paulauskas R., Zakarauskas K., Navakas R., Skvorčinskienė R. Investigation on parameters affecting biofuel drying during combustion in furnaces (<http://www.naxos2018.uest.gr>) // 6th International Conference on Sustainable Solid Waste Management 13-16 June 2018, Greece. p. 1-13
5. Skarbalius G., Misiulis E., Džiugys A., Vorotinskienė L. Numerical modeling of wood chips packed bed drying // The 15th International Conference of Young

- Scientists on Energy Issues (CYSENI 2018) Kaunas, Lithuania, May 23-25, 2018. Kaunas:LEI, 2018, ISSN 1822-7554. p. 374-382
6. Misiulis E., Skarbalius G., Vorotinskienė L., Zakarauskas K., Striūgas N., Džiugys A. Numerical model of packed bed drying of wetted wood chips with high moisture content // The 13th conference on sustainable development of energy, water and environment systems- SDEWES september 30-october 4, 2018 in Plermo, Italy. 2018. ISSN 1847-7178 SDEWES2018-0066-1

Pranešimai tarptautinėse konferencijose

1. Striūgas N., Vorotinskienė L., Džiugys A., Paulauskas R., Navakas R., Narbutas L. Optimization of automated operation of biomass furnace firing wood chips with varying properties by experimental validation of moisture prediction method //11th Conference on sustainable development of energy, water and environment systems (SDEWES 2016). September 4-9 2016 Lisbon, Portugal.
2. Vorotinskienė L., Striūgas N. Estimation of indirect fuel moisture content for intelligent control of biofuel furnaces // The 13th International Conference of Young Scientists on energy Issues (CYSENI 2016), Kaunas, Lithuania, May 26-27, 2016.
3. Vorotinskienė L., Striūgas N. Investigation of the biofuel drying intensification by experiments imitating the furnace operational processes // The 14th International Conference of Young Scientists on energy Issues (CYSENI 2017), Kaunas, Lithuania, May 25-26, 2017.
4. Vorotinskienė L., Striūgas N. Investigation of processes in a grate furnace to intensify biofuel drying // The 15th International Conference of Young Scientists on energy Issues (CYSENI 2018), Kaunas, Lithuania, May 23-25, 2018.
5. Skarbalius G., Misiulis E., Džiugys A., Vorotinskienė L. Numerical modeling of wood chips packed bed drying // The 15th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI 2018) Kaunas, Lithuania, May 23-25, 2018.
6. Vorotinskienė L., Striūgas N., Paulauskas R., Zakarauskas K., Navakas R., Skvorčinskienė R. Investigation on parameters affecting biofuel drying during combustion in furnaces (<http://www.naxos2018.uest.gr>) // 6th International Conference on Sustainable Solid Waste Management 13-16 June 2018, Greece.
7. Misiulis E., Skarbalius G., Vorotinskienė L., Zakarauskas K., Striūgas N., Džiugys A. Investigation of Various Biomass Drying Intensification Scenarios in a Packed Bed of Biomass: Experiments and Numerical Modeling // The 13th conference on sustainable development of energy, water and environment systems- SDEWES September 30-October 4, 2018 in Plermo, Italy.
8. Vorotinskienė L., Striūgas N. Determination of Drying Intensity in Stationary and Moving Layer of Wood Chips // The 16th International Conference of Young Scientists on energy Issues (CYSENI 2019), Kaunas, Lithuania, May 23-24, 2019.

Pranešimai Lietuvos konferencijose

1. Vorotinskienė L., Striūgas N. Drėgmės kitimo pakuros biokuro sluoksnyje tyrimas// Šilumos energetika ir technologijos 2017, Kaunas, Lietuva, sausio 28-29, 2017. Kaunas: KTU, 2017.
2. Vorotinskienė L., Striūgas N. Biokuro pakuroje degimo metu vykstančių veiksnių įtaka biokuro džiūvimui// Šilumos energetika ir technologijos 2018, Kaunas, Lietuva, vasario 1-2, 2018. Kaunas: KTU, 2018.
3. Vorotinskienė L., Striūgas N. Šlapio biokuro džiūvimo intensyvumą įtakančių veiksnių įtaka// Šilumos energetika ir technologijos 2019, Kaunas, Lietuva, sausio 31, 2019. Kaunas: KTU, 2019.

SL_344. 2023- - , —————* leidyb. apsk. l. Tiražas ———14 egz. Užsakymas ———*
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas